



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

VALDEIR ALVES DA SILVA JUNIOR

**ANÁLISE NUMÉRICA DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA EM BLOCOS DE
CONCRETO**

Ilha Solteira
2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VALDEIR ALVES DA SILVA JUNIOR

**ANÁLISE NUMÉRICA DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA EM BLOCOS
DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Especialidade: Estruturas

Prof^a. Dr^a. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque.
Orientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586a Silva Junior, Valdeir Alves.
Análise numérica da variação geométrica em blocos de concreto / Valdeir Alves da Silva Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
215 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2022

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque
Inclui bibliografia

1. Prismas. 2. Blocos vasados de concreto. 3. Geometria. 4. Análise numérica.



Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE NUMÉRICA DA VARIAÇÃO GEOMÉTRICA EM BLOCOS
DE CONCRETO**

AUTOR: VALDEIR ALVES DA SILVA JUNIOR

ORIENTADORA: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA
CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GUILHERME ARIS PARSEKIAN (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas
e de Tecnologia

Ilha Solteira, 10 de fevereiro de 2022

Dedico este trabalho à minha família, em especial, aos meus pais, minha irmã, as minhas amadas, esposa e filha, pois foi onde encontrei forças para continuar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a DEUS que na sua infinita bondade e misericórdia me permitiu chegar até aqui.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP por permitir e possibilitar a realização deste mestrado.

A minha prezada orientadora, Professora Dra. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, por acreditar em mim, concordar em ser minha orientadora e por sua imensa contribuição durante toda a pesquisa.

Ao Professor Dr. Amarildo Tabone Paschoalini, por todo conhecimento passado me permitindo percorrer os caminhos mais sensatos durante a construção desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Guilherme Aris Parsekian, por mostrar melhores alternativas e possibilitar melhoras para esta pesquisa.

Ao Professor Dr. José Luiz Pinheiro Melges, por ter me recebido com tanto respeito e me instruído por todo processo deste mestrado.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil, Gilson Correa e Flávio Porato, por toda dedicação, empenho e ensinamentos.

Ao meu amigo do programa de Pós-graduação da FEIS, Marcelo Bortoletto, pelos incentivos, conselhos, ensinamentos, contribuições e possibilidades diretas para a realização e desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu amigo Adriano, o qual foi fundamental para que este projeto acontecesse.

E aos meus pais que me ensinaram a ter persistência e fé em Deus e a minha esposa e filha, pois eles foram o motivo de tanta dedicação.

“E, quanto fizerdes por palavra ou por obras, fazei tudo em nome do Senhor Jesus, dando por Ele graças a Deus Pai”. A Bíblia, Cl 3,17.

RESUMO

Esta pesquisa buscou determinar, através de análises numéricas, a influência no comportamento mecânico de blocos de concreto autoadensável, com finalidade de utilização na alvenaria estrutural, considerando variações nas geometrias dos blocos estudados. A pesquisa é composta por duas etapas, na primeira etapa as soluções numéricas foram feitas com o comportamento físico e mecânico dos materiais dentro do regime linear elástico, fase elástica. Na segunda etapa as soluções numéricas foram feitas com o comportamento físico e mecânico dos materiais considerando o comportamento plástico dos mesmos, fase plástica. As validações dos resultados foram feitas, para as duas etapas da pesquisa, obtendo convergências satisfatórias das curvas de tensão vs deformação, obtidas numericamente, e as comparando com os resultados experimentais. Os resultados experimentais foram adquiridos através de um trabalho experimental. As análises experimentais consistiram em ensaios de compressão utilizando prismas de dois blocos, de concreto autoadensável, com seis diferentes tipos de geometria e três formatos geométricos vazados: circulares, hexagonais e retangulares, de diferentes áreas líquidas. Nas análises numéricas foram simulados os ensaios de compressão, conforme ensaios experimentais, e buscando uma extrapolação, foram feitas simulações do critério de início de fissuração FS, o qual verifica uma maior ou menor probabilidade do início de fissuração nos prismas, e por último realizou-se análises lineares da relação entre os parâmetros relativo às diferentes geometrias dos blocos com as tensões desenvolvidas nos mesmos. Na segunda etapa da pesquisa as análises feitas foram, as relações de tensão deformação, e simulações dos FS, com o objetivo de encontrar, dentre as geometrias estudadas, qual apresentasse um melhor comportamento, frente as solicitações impostas aos prismas. Nesta pesquisa todas as análises foram realizadas através do método de elementos finitos, utilizando o software Ansys Workbench em sua versão 2020 R2 com licença acadêmica considerando as características físicas, geométricas e condições de contorno a partir das análises experimentais. As soluções numéricas, para as curvas de tensão vs deformação, tanto na primeira etapa quanto na segunda se mostraram com uma boa convergência quando comparadas com os resultados experimentais. Notou-se que as distribuições de tensões de tração e compressão

nos blocos variam de geometria para geometria, podendo se desenvolver de formas diferentes na face externa e interna dos blocos com dimensões e geometrias diferentes. Para os resultados dos FS, as simulações considerando a plasticidade dos materiais, se apresentaram com soluções equivalentes às análises experimentais. As soluções dos FS mostraram que a área líquida do bloco não é o fator principal para maior ou menor resistência do bloco. As correlações lineares entre parâmetros mostraram que a disposição, dimensão e formato geométrico do vazado no bloco influencia de formas diferentes no desenvolvimento de tensões no bloco.

Palavras-chave: prismas; blocos vasados de concreto; geometria; análise numérica.

ABSTRACT

This research aimed to determine through numerical analysis the influence on the mechanical behavior of self-compacting concrete blocks, used in structural masonry, considering variations in the geometry of the studied blocks. The research is composed of two stages, in the first one the numerical solutions were made with the physical and mechanical behavior of the materials within the linear elastic regime, elastic phase. In the second stage, numerical solutions were made with the physical and mechanical behavior of the materials considering their plastic behavior, plastic phase. The validations of the results were carried out for both stages of the research obtaining satisfactory convergences of the stress vs strain curves, obtained numerically, and comparing them with the experimental results. Experimental results were acquired through experimental work. The experimental analyzes consisted of compression tests using two-block prisms made of self-compacting concrete with six different types of geometry and three hollow geometric shapes: circular, hexagonal and rectangular, with different liquid areas. In the numerical analysis the compression tests were simulated according to experimental tests, and seeking an extrapolation, simulations of the cracking initiation criterion FS were performed, which verifies a greater or lesser probability of the beginning of cracking in prisms, and finally was performed linear analysis of the relation between the parameters related to the different block geometries with the stresses developed in them. In the second stage of the research, the analyzes performed were stress-strain relations and FS simulations, with the aim of finding, among the studied geometries, which one presented a better behavior for geometrical variation in face of the demands imposed on the prisms. In this research all analyzes were performed using the finite element method, using the Ansys Workbench software in its 2020 R2 version with academic license considering the physical, geometric and boundary conditions from the experimental analyses. The numerical solutions for the stress vs strain curves, both the first and second stages of the analyzes showed good convergence when compared to the experimental results. It was noted that the tensile and compression stress distributions in blocks vary from geometry to geometry, and may develop in different ways on the external and internal face of blocks with different dimensions and geometries. For the SF results, the simulations

considering the plasticity of the materials presented themselves with solutions equivalent to the experimental analyzes. The FS solutions showed that the net area of the block is not the main factor for greater or lesser block resistance. The linear correlations between parameters showed that the arrangement, dimension and geometric shape of the hollow in the block influence, in different ways, the stress development in the block.

Keywords: prisms; concrete hollow blocks; geometry; numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Geometrias dos blocos de concreto	29
Figura 2.1	- Estado de tensões atuantes nos blocos e nas juntas de argamassa	40
Figura 2.2	- Modo de ruptura dos prismas	41
Figura 2.3	- Tensão de compressão axial em Y (esquerda) e X (direita) - (MPa)	43
Figura 2.4	- Gráfico da curva tensão vs deformação e a comparação entre as soluções numéricas e experimentais.....	44
Figura 3.1	- Relações constitutivas elásticas: (a) Comportamento elástico linear e (b) Comportamento elástico não-linear	47
Figura 3.2	- Relações constitutivas plásticas: Comportamento Plástico perfeito (a) e Comportamento Plástico com endurecimento (b)	48
Figura 3.3	- Curva tensão vs deformação para materiais frágeis e dúcteis	49
Figura 3.4	- Diagrama de falha para a teoria da tensão normal máxima (tensão plana)	52
Figura 3.5	- Representação do Critério de Mohr-Coulomb.....	53
Figura 3.6	- Critério de Mohr-Coulomb – Superfície de envoltória de ruptura	53
Figura 3.7	- Superfície de falha no espaço tridimensional das tensões principais	57
Figura 3.8	- Superfície de ruptura em duas dimensões	58
Figura 3.9	- Diagrama σ - ϵ para concreto de mistura típica	59
Figura 3.10	- Comportamento uniaxial do modelo para materiais frágeis	60
Figura 3.11	- Curva tensão deformação típica para compressão axial.....	61

Figura 3.12	- Tração uniaxial do concreto	61
Figura 3.13	- Curva tensão deformação nos regimes pré e pós-falha sob tração e compressão	62
Figura 3.14	- Endurecimento isotrópico	64
Figura 3.15	- Histórico dos módulos de elasticidade inicial e da fase plástica instantâneos	65
Figura 3.16	- Módulos de elasticidade inicial e da fase plástica	66
Figura 4.1	- Técnicas de modelagem para alvenaria: (a) Exemplar de alvenaria; (b) Micro modelagem detalhada; (c) Micro modelagem simplificada; (d) Macro modelagem.	68
Figura 4.2	- Resistência média: Tensão deformação (CAA)	71
Figura 4.3	- Gráfico tensão deformação do CAA	72
Figura 4.4	- Convergência dos Módulos da fase plástica	73
Figura 4.5	- Elemento finito prismático regular parabólico com vinte nós	77
Figura 4.6	- Gráfico Força x Deslocamento comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A01	78
Figura 4.7	- Gráfico Força x Deslocamento comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A02	79
Figura 4.8	- Gráfico Força x Deslocamento comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A02-G1	80
Figura 4.9	- Vetores das tensões principais máxima, médias e mínimas	82
Figura 4.10	- Vetores das deformações principais máxima, médias e mínimas	83
Figura 4.11	- Amostra esquemática do confinamento de tensão no prisma	84
Figura 4.12	- Esquema para o ensaio de determinação da resistência do prisma (f_p) com a instrumentação para a	

	determinação do módulo de deformação (E_p)	85
Figura 4.13	- Marcações e posicionamentos dos LVDTs e extensômetros (Strain Gages)	86
Figura 4.14	- Prisma instrumentado por LVDTs e extensômetros (Strain-Gages)	86
Figura 4.15	- Coordenadas x, y, z da região que simula o local do extensômetro	87
Figura 4.16	- Coordenadas globais dos prismas	88
Figura 4.17	- Elementos de malha	89
Figura 4.18	- Estrutura geométrica do elemento SOLID185	91
Figura 4.19	- Estrutura geométrica do elemento SOLID187	92
Figura 4.20	- Elemento TARGE170	93
Figura 4.21	- Elemento CONTA174	93
Figura 5.1	- Eixos globais de referência para os prismas	95
Figura 5.2	- Faces de contato entre o bloco e argamassa	98
Figura 5.3	- Malha Hexaedra com refinamento controlado nas interfaces com 6 e 12 mm	99
Figura 5.4	- Condição de carregamento no prisma	103
Figura 6.1	- Convergência das malhas 25, 20, 10 e 6 mm	108
Figura 6.2	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1	111
Figura 6.3	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 2	112
Figura 6.4	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 1	113
Figura 6.5	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 2	114
Figura 6.6	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 1	115
Figura 6.7	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 2	116
Figura 6.8	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1 para o	

	comportamento plástico do material	117
Figura 6.9	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC2 para o comportamento plástico do material	118
Figura 6.10	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH1 para o comportamento plástico do material	118
Figura 6.11	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH2 para o comportamento plástico do material	119
Figura 6.12	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR1 para o comportamento plástico do material	120
Figura 6.13	- Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR2 para o comportamento plástico do material	120
Figura 6.14	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGC I – FS ELÁSTICO	122
Figura 6.15	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGC II – FS ELÁSTICO	123
Figura 6.16	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGH I – FS ELÁSTICO	123
Figura 6.17	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGH II – FS ELÁSTICO	124
Figura 6.18	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGR I – FS ELÁSTICO	124
Figura 6.19	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGR II – FS ELÁSTICO	125
Figura 6.20	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGC I – FS PLÁSTICO	125
Figura 6.21	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGC II – FS PLÁSTICO.....	126
Figura 6.22	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início	

	de fissuração – PGH I – FS PLÁSTICO	126
Figura 6.23	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGH II – FS PLÁSTICO	127
Figura 6.24	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGR I – FS PLÁSTICO	127
Figura 6.25	- Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGR II – FS PLÁSTICO	128
Figura 6.26	- Gráfico dos critérios para início de fissuração FS em prismas de três blocos dentro do regime elástico e plástico dos materiais	129
Figura 6.27	- Gráfico das curvas entre os critérios para início de fissuração $FS_{Elástico}$, $FS_{Plástico}$, o f_{cp} e suas respectivas áreas líquidas de cada geometria	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração dos blocos.....	35
Tabela 2.2	- Propriedades mecânicas das argamassas obtidas do estudo de Khalaf e Fairbain (1992)	38
Tabela 4.1	- Propriedades do concreto utilizados nos CP _s	71
Tabela 4.2	- Módulo inicial elástico, o módulo da fase plástica e a tensão de escoamento do concreto.....	73
Tabela 4.3	- Propriedades da argamassa utilizado nos CPs – Comportamento elástico	74
Tabela 4.4	- Módulo inicial elástico, módulo da fase plástica e tensão de escoamento da argamassa	75
Tabela 4.5	- Ensaios realizados com os prismas por Albertini (2009)	78
Tabela 4.6	- Comparação entre resultados experimentais e numéricos, PO (Prisma de Oliveira)	81
Tabela 4.7	- Comparação entre resultados experimentais e numéricos, PA (Prismas dos Autores)	81
Tabela 5.1	- Valores de C para cada tipo de elemento	96
Tabela 5.2	- Calibração da configuração de refinamento da malha para análise numérica	98
Tabela 5.3	- Parâmetros de malha Tetraédrica para calibração	100
Tabela 5.4	- Parâmetros de malha Hexa Dominante para calibração	101
Tabela 5.5	- Parâmetros de malha Hexa Dominante Independente para calibração	101
Tabela 5.6	- Tensões aplicadas no modelo numérico nos prismas	104
Tabela 6.1	- Parâmetros da malha Hexaédrica Independente	107
Tabela 6.2	- Parâmetros da malha Tetraédrica	107
Tabela 6.3	- Parâmetros da malha Hexaédrica Dependente	107
Tabela 6.4	- Deformação vertical numérica e experimental	109
Tabela 6.5	- Soluções paramétricas entre variações geométricas e tensões principais no bloco	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AEPGC1-P5E2	Análise experimental do prisma circular - Prisma 5 Extensômetro 2
AEPGC1-P5E1	Análise experimental do prisma circular - Prisma 5 Extensômetro 1
AEPGC1-P6E2	Análise experimental do prisma circular - Prisma 6 Extensômetro 2
AEPGH1-P3E2	Análise experimental do prisma hexagonal - Prisma 1 Extensômetro 2
AEPGH1-P1E1	Análise experimental do prisma hexagonal - Prisma 1 Extensômetro 1
AEPGH1-P6E2	Análise experimental do prisma hexagonal - Prisma 1 Extensômetro 1
AN	Análise Numérica
BGC I	Geometria do Bloco Circular I
BGH I	Geometria do Bloco Hexagonal I
BGR I	Geometria do Bloco Retangular I
CV	Coeficiente de Variação
CP _s	Corpos de Prova
D	Dependente
I	Independente
FS _P	Critério para início de escoamento – Fase plástica
FS _P	Critério para início de escoamento – Fase plástica
MEF	Método de elementos finitos

NBR	Norma brasileira regulamentadora
PGC 1	Geometria do Prisma Circular 1 de dois blocos
PGC 2	Geometria do Prisma Circular 2 de dois blocos
PGH 1	Geometria do Prisma Hexagonal 1 de dois blocos
PGH 2	Geometria do Prisma Hexagonal 2 de dois blocos
PGR 1	Geometria do Prisma Retangular 1 de dois blocos
PGR 2	Geometria do Prisma Retangular 2 de dois blocos
PGC I	Geometria do Prisma Circular I de três blocos
PGC II	Geometria do Prisma Circular II de três blocos
PGH I	Geometria do Prisma Hexagonal I de três blocos
PGH II	Geometria do Prisma Hexagonal II de três blocos
PGR I	Geometria do Prisma Retangular I de três blocos
PGR II	Geometria do Prisma Retangular II de três blocos

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ΔL	Deslocamento
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
a/c	Água/ cimento
cm	Centímetros
CV	Coeficiente de variação
E_{arg}	Módulo de elasticidade da argamassa
E_{at}	Módulo de elasticidade da argamassa
E_b	Módulo de elasticidade do bloco
E_p	Módulo de elasticidade do prisma
E_{TP}	Módulo da fase plástica
ε_e	Deformação resultante de Von-Mises
ε	Deformação específica
π	Pi
f_a	Resistência média à compressão da argamassa
f_{bm}	Resistência média à compressão dos blocos
f_{bk}	Resistência característica à compressão dos blocos
f_b	Resistência à compressão dos blocos
F_e	Fator de eficiência
f_{tb}	Resistência à tração dos blocos
f_{pm}	Resistência média à compressão dos prismas
f_{au}	Resistência última da argamassa
f_{ya}	Resistência de escoamento da argamassa
g	Grama
GPa	Giga Pascal

H	Altura do bloco
kg	Quilograma
L	Comprimento do bloco
L ₀	Comprimento Inicial
Mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
MPa	Mega Pascal
S _d	Desvio Padrão
σ_e	Tensão de Equivalente
σ_r	Tensão de Ruptura
σ_{Max-X}	Tensão máxima principal na direção X
σ_{Max-Y}	Tensão máxima principal na direção Y
σ_{Min-Y}	Tensão mínima principal na direção Y
$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$	Tensões principais em x, y e z
σ_1	Tensão máxima (σ_{max}) - Tração
σ_3	Tensão mínima (σ_{min}) - Compressão
σ_{ut}	Resistência última à tração do material
σ_{uc}	Resistência última à compressão do material
σ_{yt}	Resistência ao escoamento à tração do material
σ_{yc}	Resistência ao escoamento à compressão do material
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{max}	Tensão de cisalhamento máxima
$\cong$	Aproximadamente igual
$\geq$	Maior ou igual
$\leq$	Menor ou igual
Δ	Variação
Vs	Versus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	TEMA.....	25
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	27
1.3	OBJETIVOS	30
1.4	MOTIVAÇÃO.....	31
2	MATERIAIS E COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL	33
2.1	PROPRIEDADES DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO.....	33
2.2	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA.....	35
2.3	PRISMAS.....	39
2.4	COMPORTAMENTO DE PRISMAS.....	40
2.5	GEOMETRIA DE BLOCOS VAZADOS.....	45
3	MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS.....	46
3.1	MODELO ELÁSTICO.....	46
3.2	MODELO PLÁSTICO.....	48
3.3	CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO DOS MATERIAIS.....	49
3.3.1	Critério da tensão de Von Mises.....	50
3.3.2	Critério do escoamento de Tresca.....	50
3.3.3	Critério de W. Rankine.....	51
3.3.4	Critério de Mohr–Coulomb.....	52
3.3.5	Critério de Drucker-Prager.....	55
3.4	COMPORTAMENTO DO CONCRETO.....	58
3.4.1	Comportamento do Concreto – Estado Uniaxial.....	59
3.5	MODELO PLÁSTICO DOS MATERIAIS.....	62
3.5.1	Endurecimento Isotrópico.....	63
3.5.2	Endurecimento Isotrópico Multilinear.....	64
3.5.3	Endurecimento Isotrópico Bilinear.....	65
4	MODELAGEM NUMÉRICA.....	66
4.1	MODELAGEM DA ALVENARIA	67
4.2	HIPÓTESES ADOTADAS NA MODELAGEM NUMÉRICA.....	69
4.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS NA ANÁLISE NUMÉRICA.....	70
4.3.1	Propriedades do concreto – comportamento elástico linear.....	70

4.3.2	Propriedades do concreto – comportamento plástico.....	72
4.3.3	Propriedades da argamassa - comportamento elástico linear.....	74
4.3.4	Propriedades da argamassa - comportamento plástico.....	75
4.4	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS – CURVAS DE TENSÃO VS DEFORMAÇÃO.....	75
4.5	CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO	82
4.6	VETORES DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS	82
4.7	CRITÉRIO PARA INÍCIO DE FISSURAÇÃO - FS	83
4.8	INSTRUMENTAÇÃO DA ALVENARIA	85
4.9	DISCRETIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA ALVENARIA POR ELEMENTOS SÓLIDOS TRIDIMENSIONAIS	88
4.10	MODELAGEM DOS COMPONENTES DOS PRISMAS.....	91
5.0	ANÁLISE NUMÉRICA	94
5.1	GEOMETRIA DOS PRISMAS.....	94
5.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPONENTES.....	95
5.3	DISCRETIZAÇÃO DA MALHA.....	95
5.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	102
5.4.1	Carregamento.....	102
5.4.2	Restrições.....	104
5.5	CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS.....	105
5.5.1	Análises dos critérios de início de fissuração - FS.....	105
5.5.2	Análises das correlações paramétricas.....	105
6	RESULTADOS.....	107
6.1	PARÂMETROS DE MALHA OBTIDOS NA SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	107
6.2	CONVERGÊNCIAS DAS CURVAS DE TENSÃO VS DEFORMAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS.....	109
6.3	TENSÕES PRINCIPAIS NOS BLOCOS.....	121
6.3.1	Soluções numéricas das tensões principais mínimas e máximas...	121
6.4	CRITÉRIO DE INÍCIO DE FISSURAÇÃO FS.....	122
6.4.1	Soluções numéricas para o FS dos prismas de três blocos.....	128
6.5	QUANTIFICAÇÃO DAS CORRELAÇÕES PARAMÉTRICAS.....	131
6.5.1	Correlações paramétricas dos blocos vazados de concreto.....	131

7	CONCLUSÕES.....	134
	REFERÊNCIAS.....	136
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DA CURVA TENSÃO VS DEFORMAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS COM TODAS AS CONFIGURAÇÕES DE MALHA PARA O COMPORTAMENTO ELÁSTICO DOS MATERIAIS.....	141
	APÊNDICE B – GRÁFICOS TRIDIMENSIONAIS DAS TENSÕES MÍNIMAS E MÁXIMAS COM TODAS AS CONFIGURAÇÕES DE MALHA TETRAÉDRICAS E HEXAÉDRICAS.....	150
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS CORRELAÇÕES LINEARES PARAMÉTRICAS DA INFLUÊNCIA ENTRE OS PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA NAS ANÁLISES DAS TENSÕES NOS BLOCOS BGC I, BGH I E BGR I.....	204
	APÊNDICE D – GRÁFICOS DAS TENSÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E IMAGENS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS FISSURAS E RUPTURAS DOS PRISMAS.....	211

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Alvenaria é o conjunto de unidades justapostas e colados em suas interfaces por argamassas apropriadas, formando um conjunto de elementos vertical e coeso. Esse conjunto pode ter como função resistir as cargas oriundas da gravidade, resistir as cargas de impactos, à ação do fogo, ou somente como função de vedação do interior de ambientes (TAUIL; NESE, 2010).

Conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 16868-1:2020, a alvenaria estrutural é composta por blocos, tijolos, argamassa, graute e aço. Os blocos podem ser de concreto ou cerâmico, quando de concreto suas especificações devem ser conforme ABNT NBR 6136. Para blocos e tijolos cerâmicos suas especificações devem serem feitas de acordo com a ABNT NBR 15270-1.

As argamassas destinadas ao assentamento devem atender aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 13281:2005. Para evitar risco de fissuras a resistência à compressão da argamassa deve ser limitada a 1,5 vez a resistência característica específica do bloco utilizado.

Para análise do comportamento estrutural da alvenaria a ABNT NBR 16868 – 3/2020 define que a determinação da resistência à compressão da alvenaria pode ser feita através de paredes, pequenas paredes ou prismas. Sendo recomendado que ensaios em prismas sejam executadas com materiais de mesma origem e características dos lotes que serão efetivamente utilizados na estrutura.

A análise estrutural prevê o comportamento da estrutura mediante às solicitações impostas a mesma, sendo utilizada para prever possíveis danos estruturais no elemento estudado, permitindo assim prognosticar os locais de maiores deformações, concentrações de tensão e áreas passíveis de rupturas.

Segundo Faglioni (2006), a análise estrutural pode ser linear ou não-linear. A análise linear se caracteriza pela manutenção da geometria inicial como referência de equilíbrio, linearidade geométrica, e da manutenção das propriedades físicas específicas do material, linearidade física.

Para o caso da análise não-linear, considera-se a alteração da geometria, não-linearidade geométrica, ou das propriedades físicas do material, não-linearidade

física, ou dupla não-linearidade, em que tanto a alteração geométrica e física ocorre (ALBERTINI, 2009).

O principal objetivo das análises estruturais estáticas, análises em que a intensidade, direção e sentido não variem com o tempo, são as determinações das distribuições, magnitudes das tensões e deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural.

O campo de tensões calculado deve representar um sistema de esforços internos e externos em equilíbrio e, simultaneamente, os deslocamentos devem ser contínuos, garantindo a condição de compatibilidade da estrutura.

Conforme Rodrigues (1997, citado por Faglioni 2006), os sistemas estruturais são, geralmente, admitidos como meios contínuos, e as equações de equilíbrio que governam esses sistemas são equações diferenciais parciais. Estas equações devem satisfazer as condições de contorno dos sistemas estruturais, possuindo, portanto, um número infinito de graus de liberdade em função dessa continuidade, tornando a resolução do problema mais difícil.

Com o surgimento do computador, foram desenvolvidos métodos numéricos, os quais são capazes de obter soluções aproximadas para problemas complexos de engenharia, por meio da utilização de sistemas discretos, discretizando o sistema estrutural em um número finito de elementos e graus de liberdade.

De interesse da engenharia esses procedimentos de soluções aproximadas podem ser utilizados em caráter geral, independente da geometria da estrutura e da condição de carregamento, sendo um caminho alternativo aos procedimentos analíticos (AVELINO, 2016).

Conforme exposto este trabalho tem como tema a verificação da relação entre análises experimentais e numéricas. Os resultados analisados foram as distribuições de tensão em prismas de dois blocos de concreto autoadensável. Estes prismas foram estudados a partir de seis diferentes geometrias de blocos com diferentes áreas líquidas, sendo estas geometrias constituídas de vazados circulares, hexagonais e retangulares.

A pesquisa foi realizada, em uma primeira etapa, dentro do regime elástico-linear físico dos materiais e geométrico dos blocos. Uma segunda etapa foi realizada considerando o comportamento plástico dos materiais.

Para a primeira etapa, considerou-se convergências satisfatórias para as curvas tensão vs deformação das soluções numéricas com as análises

experimentais, como também foram analisadas as distribuições de tensão nos prismas. Também buscou-se observar os fatores de segurança, FS, desenvolvidos nos blocos dos prismas e compará-los com as resistências dos blocos ensaiados experimentalmente.

Os FS foram condicionados para maior ou menor probabilidade do início de fissuração nos prismas, considerando as tensões de tração induzidas nos blocos a partir dos ensaios de compressão nos mesmos. Por último verificou-se a correlação linear de influência entre os parâmetros das variações geométricas dos blocos com as tensões desenvolvidas nos mesmos.

Para a segunda etapa da pesquisa, a plasticidade dos materiais foi adotada nas propriedades físicas dos materiais e as análises tiveram como objetivo encontrar uma melhor convergência para as soluções relativas às curvas de tensão vs deformação e obter melhores resultados de comparação para as simulações dos FS, haja vista que as soluções no regime linear se mostraram divergentes, para o prisma de geometria retangular, quando comparado com as resistências dos blocos retangulares, ensaiados experimentalmente por Bortoletto (2020).

1.2 Definição do problema

Bortoletto (2020), estudou seis diferentes geometrias alternativas de blocos de concreto autoadensável para utilização na alvenaria estrutural e a possibilidade da aplicação deste concreto para a fabricação destes blocos. Também avaliou o comportamento físico, mecânico e térmico dos blocos em função do formato geométrico e espessura das paredes dos blocos.

Ele desenvolveu uma dosagem adequada do concreto autoadensável para a fabricação das unidades e verificou a melhor geometria proposta para os blocos vazados de concreto de alvenaria estrutural, considerando à resistência à compressão axial como parâmetro qualitativo.

Todas as soluções da pesquisa de Bortoletto (2020) foram realizadas através de ensaios experimentais de compressão em blocos de concreto e prismas constituídos de dois blocos.

A presente pesquisa consiste em utilizar os resultados do trabalho experimental realizado por Bortoletto (2020) como os dados físicos dos materiais, as resistências últimas dos prismas, a curva tensão vs deformação e a partir da coleta

destes dados realizar uma análise numérica utilizando o método de elementos finitos (MEF) com o programa Ansys e, dentro do regime elástico linear e plástico dos materiais, obter resultados que apresentassem uma boa aproximação com os resultados experimentais, desta forma seria possível validar a modelagem, e a partir desta validação descobrir como se desenvolve as distribuições de tensão nos blocos e o quanto as diferentes geometrias dos blocos estudados modificam o comportamento dos prismas frente as solicitações impostas.

A primeira verificação desta pesquisa foi observar a curva tensão vs deformação nos prismas de dois blocos, usando as seis diferentes geometrias utilizadas nos ensaios experimentais de Bortoletto (2020). Para validação do modelo numérico foram feitas comparações dos resultados experimentais feitos por Bortoletto (2020) com os resultados obtidos numericamente.

Para comparação das curvas tensão vs deformação, as tensões estudadas foram as tensões mínimas principais na direção Y, sendo desconsideradas as tensões desenvolvidas na base dos prismas, pois as mesmas se apresentavam sob tensões de confinamento, apresentando, portanto, tensões muito acima do valor real.

As tensões máximas principais, tensão de tração nos prismas, foram estudadas procurando estabelecer qual geometria apresentaria uma maior concentração de tensão, mostrando assim qual delas teria uma maior disposição para início de fissuração.

A segunda verificação desta pesquisa foi desenvolver o estudo dos FS considerando o critério de tensão máxima de escoamento do material. Para a pesquisa dos FS foi optado por construir prismas de três blocos, observando os esforços no bloco central do prisma, evitando assim as tensões de confinamento que surgem na base de prismas ensaiados à compressão.

Por fim a terceira verificação desta pesquisa consiste em investigar as correlações lineares de dependência entre os parâmetros relativos às variações dimensionais das geometrias dos blocos e as tensões principais desenvolvidas nos mesmos após simulação de ensaio à compressão.

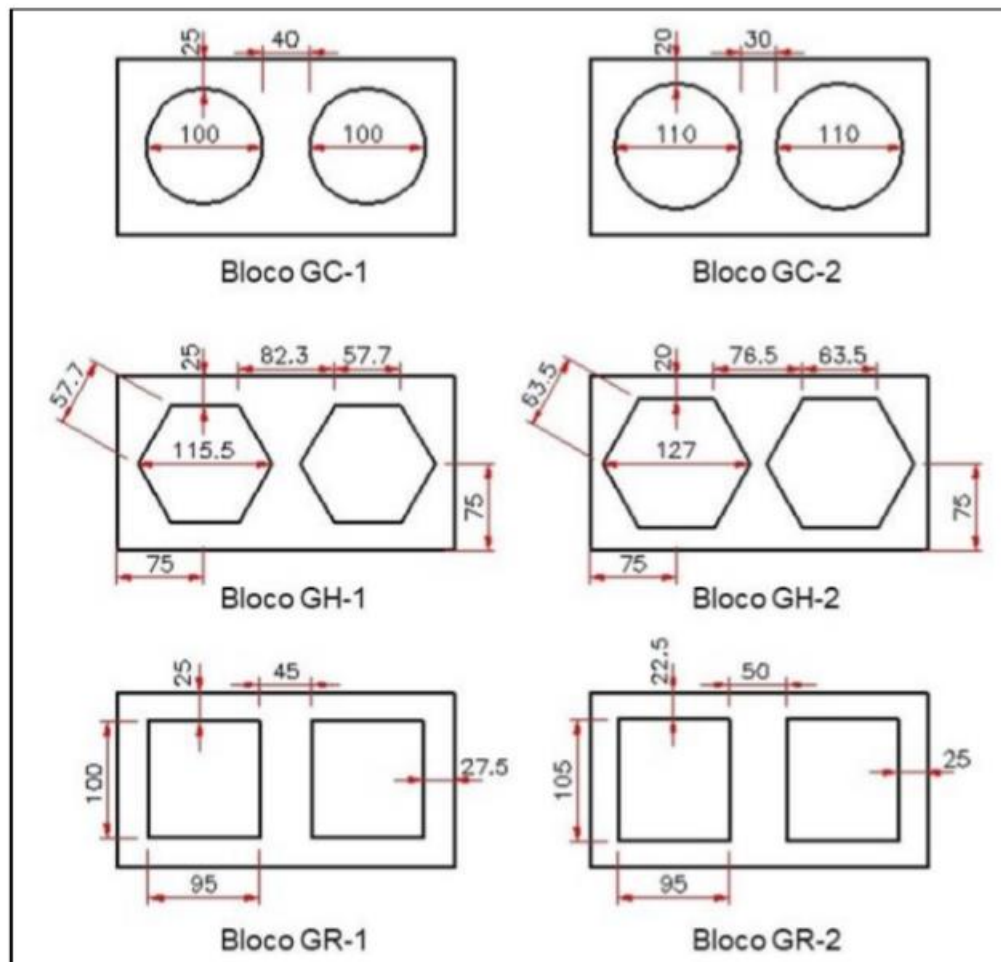
A correlação de dependência foi realizada procurando observar se a quantificação de um parâmetro de saída foi dependente de um parâmetro de entrada, mostrando se existe ou não influência entre eles. Para a pesquisa de

correlação paramétrica foi optado pela simulação em um único bloco não sendo utilizado simulação em prismas.

A Figura 1.1 apresenta as geometrias, com suas dimensões em milímetros, utilizada por Bortolletto (2020) para realização das análises experimentais, as quais também foram discretizadas na análise numérica.

Na Figura 1.1 a nomenclatura GC – 1 é o bloco com vazado de geometria circular, o qual possui área líquida maior que o bloco com vazado circular 2 (GC – 2), o GH – 1 é o bloco com vazado de geometria hexagonal que possui área líquida maior que o vazado hexagonal 2 (GH – 2), o bloco GR – 1 é o bloco com vazado de geometria retangular, o qual possui área líquida maior que o vazado retangular 2.

Figura 1.1 – Geometrias dos blocos de concreto



Fonte: Bortolletto (2020).

Para a atual pesquisa os prismas de dois blocos, utilizados na análise numérica para pesquisar a curva tensão vs deformação, foram utilizadas as siglas

PGC 1 e PGC 2, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria circular conforme (GC -1) e (GC – 2) respectivamente; PGH 1 e PGH 2, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria hexagonal conforme (GH -1) e (GH – 2) respectivamente; e PGR 1 e PGR 2, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria retangular conforme (GR -1) e (GR – 2) respectivamente.

Para a atual pesquisa os prismas de três blocos, utilizados na análise numérica do fator de segurança para início de fissuração, foram utilizadas as siglas: PGC I e PGC II, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria circular conforme (GC -1) e (GC – 2) respectivamente; PGH I e PGH II, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria hexagonal conforme (GH -1) e (GH – 2) respectivamente; e PGR I e PGR II, a qual refere-se a prismas construídos com blocos de mesma geometria retangular conforme (GR -1) e (GR – 2) respectivamente.

As nomenclaturas utilizadas para descrever as geometrias dos blocos, utilizadas na análise numérica nas correlações paramétricas, foram as siglas BGC I, a qual refere-se a mesma geometria do bloco circular (GC -1), BGH I, a qual refere-se a mesma geometria do bloco hexagonal (GH -1) e BGR I, a qual refere-se a mesma geometria do bloco retangular (GR -1).

As geometrias BGC I, BGH I e BGR I tem suas dimensões iniciais conforme GC 1, GH 1 e GR 1, e para a realização das análises paramétricas foi aplicada uma variação na geometria inicial de 5 mm nos vazados das respectivas geometrias BGC I, BGH I e BGR I.

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivos:

- Modelar, discretizar e analisar numericamente prismas de blocos de concreto com seis diferentes geometrias através dos métodos de elementos finitos, MEF, utilizando o programa Ansys. Toda modelagem se configura com as mesmas características obtidas experimentalmente, ou a adotados a partir de modelos teóricos;
- Determinar qual melhor tipologia e ordem de malha a ser utilizada na

discretização dos componentes para obter uma melhor convergência e qualidade de malha na discretização;

- Validar a modelagem numérica por meio de comparações dos resultados obtidos experimentalmente, para os valores das curvas tensão vs deformação de cada geometria, com as soluções obtidas numericamente;

- Pesquisar através de ferramentas de modelagem a maior ou menor tendência ao escoamento para cada geometria discretizada numericamente e determinar qual geometria apresenta maior ou menor resistência ao início de escoamento do concreto;

- Avaliar através das análises numéricas as correlações entre as variações geométricas e tensões desenvolvidas nos blocos e observar como estas correlações se desenvolvem numericamente; e

A partir dos resultados dos critérios de início de escoamento - FS determinar dentro do conjunto das geometrias estudadas, considerando as áreas próximas as interfaces bloco argamassa, a melhor geometria frente as solicitações estudadas.

1.4 Motivação

Hoje o mercado da construção civil, exige que, para qualquer tipo de análise estrutural é necessário a utilização de métodos práticos que requerem um menor tempo e custo possível para modelar e executar todo tipo de verificação.

Por este motivo o estudo utilizando os métodos numéricos é tão importante, pois o mesmo apresenta condições de pesquisa que condiciona uma aproximação aceitável do real, sem a necessidade de utilização de grandes quantidades de protótipos e amostras para uma pesquisa, possibilitando um menor custo e muitas vezes um menor tempo para obtenção dos resultados.

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que integra maior velocidade na execução e maior economia na obra, por este motivo está ganhando cada vez mais mercado no Brasil e o componente mais comum utilizado para a construção de edificações em alvenaria estrutural ainda é o bloco de concreto (MARTINES, 2017).

Devido à natureza heterogênea e composta da alvenaria estrutural, o seu comportamento é extremamente complexo. Seu comportamento mecânico é influenciado pela quebra de ligações de tijolo/bloco e argamassa, em que esta interface de ligação funciona como plano de fragilidade (D'ALTRI *et al.*, 2018).

Segundo Rizzatti *et al.* (2011), o desempenho da alvenaria estrutural depende dos materiais e suas interações, e para melhorar a qualidade da alvenaria é importante compreender os fenômenos internos que geram e desenvolvem as tensões, em que o bloco tem um papel fundamental na distribuição dessas tensões.

A quantidade de furos, formas e disposições podem acarretar, durante a aplicação de carregamentos, concentrações de tensões no bloco que levam a alvenaria a reduzir o seu potencial resistente (RIZZATTI *et al.*, 2012).

Portanto a realização de pesquisas que estudem a geometria dos blocos para a alvenaria estrutural poderá auxiliar no desenvolvimento deste importante setor industrial.

A alvenaria estrutural necessita de avanços tecnológicos no desígnio de se aproximar do adiantamento em que operam as estruturas de concreto armado. Neste sentido, avaliar diferentes alternativas tecnológicas torna-se uma necessidade, a fim de melhorar o desempenho e as propriedades mecânicas das estruturas de alvenaria (COSTA *et al.*, 2015).

Embora avanços significativos tenham sido realizados nas últimas décadas, definir estratégias numéricas para uma descrição adequada do comportamento mecânico da alvenaria ainda não é comum e necessita de um processo contínuo na área científica (D'ALTRI *et al.*, 2018).

Análises estruturais podem ser analisadas por diferentes métodos, sendo que dependendo do método os resultados podem ser mais ou menos preciso.

Dentre os métodos existentes tem-se:

- Os Métodos Analíticos, que utilizam equações matemáticas elementares disponíveis em literaturas de engenharia ou procedimentos descritos em normas técnicas. Este método define variáveis de entrada para obter soluções de saída. É um método menos preciso, pois distribuição de tensões e deformações pré-definidas, podem não ser verdadeiras, além de ser um método restrito a geometrias simples.

- Os Métodos Experimentais, que são as análises realizadas em protótipos, in loco ou laboratório, onde todas as características físicas e construtivas destes protótipos são fielmente conforme projetos ou produtos reais. Esse método de análise fornece soluções com alta qualidade, porém necessita de alto investimentos.

- Os Métodos Numéricos, os quais são as análises realizadas em protótipos virtuais, podendo ser aplicadas tanto em estruturas com geometria simples como

também em geometrias mais complexas, são fundamentados em teorias matemáticas, baseados na mecânica do contínuo como a teoria da elasticidade e a teoria da plasticidade.

Este tipo de análise possibilita estudar detalhes que muitas vezes não são possíveis nas análises experimentais e analíticas. Ele apresenta soluções aproximadas e o seu custo é significativamente inferior ao método experimental.

Os Métodos Numéricos possibilitam estudar detalhes que muitas vezes não são possíveis nas análises experimentais e analíticas. Ele apresenta soluções aproximadas e o seu custo é significativamente inferior ao método experimental. Eles são capazes de transformar o sistema estrutural contínuo em um sistema estrutural discreto, com um número finito de graus de liberdade, gerando boas soluções no que diz respeito ao comportamento real da estrutura. Dentre esses métodos, pode-se citar o Método das Diferenças Finitas, Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno, entre outros (ALBERTINI, 2009).

Considerando o que foi apresentado o presente trabalho vem a contribuir com a análise numérica de prismas de alvenaria estrutural com diferentes geometrias, e assim validar um modelo numérico capaz de determinar o comportamento destes prismas, podendo com isto para avaliar qual geometria dentre as estudadas apresenta uma melhor condição estrutural.

2 MATERIAIS E COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

2.1 Propriedades dos blocos vazados de concreto

De acordo com Nascimento (2015), a resistência à compressão do bloco é a principal característica na resistência dos prismas e paredes.

Segundo La Rovere, (2001 citado por MATA, 2006), quanto maior a resistência da unidade, maior será a resistência à compressão da alvenaria, porém observa-se que a resistência à compressão da alvenaria é menor do que a resistência à compressão da unidade.

Isto ocorre pelo fato de que a resistência medida do bloco não é a verdadeira resistência, e sim um valor superior ao verdadeiro, que ocorre devido a restrição nas extremidades das unidades causada pelos pratos da prensa de ensaio, em que, dependendo da geometria do bloco, gera tensões de compressão transversais na alvenaria, semelhante a um ensaio triaxial à compressão.

Essa maior resistência ocorre também quando a argamassa é mais deformável do que as unidades, pois ela tenderá a deformar-se mais do que as unidades e esta deformação é restringida pela aderência entre estes componentes, o que provoca o surgimento de tensões de tração nas unidades transversalmente ao eixo vertical de compressão.

A composição dos painéis e paredes na alvenaria estrutural é composta por 90 a 95% das unidades (blocos). Portanto a resistência a esforços de compressão é fundamental para o conjunto, já que a principal função da alvenaria estrutural é resistir aos esforços de compressão atuantes (ALBERTINI, 2009).

O bloco vazado de concreto é um componente que, pode ter ou não função estrutural, sendo vazado na face inferior e superior e tendo a área líquida (área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas máximas dos vazios) $\leq$ à 75% da área bruta (ABNT NBR 6136:2016).

A NBR 6136 (ABNT, 2016), determina alguns requisitos físicos mecânicos limites para os blocos vazados de concreto como dimensões, absorção, retração, os materiais utilizados para a produção das unidades e a resistência característica à compressão mínima para blocos estruturais e não estruturais.

A Tabela 2.1 mostra os parâmetros definidos conforme descrito acima.

Tabela 2.1 – Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração dos blocos

Classificação	Classe	Resistência Característica à compressão axial MPa ^a	Absorção %				Retração ^d %
			Agregado normal ^b		Agregado leve ^c		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	≤ 8	≤ 6	≤ 16	≤ 13	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} \leq 8,0$	≤ 10	≤ 8			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	≤ 12	≤ 10			

^a Resistência Característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

^b blocos fabricados com agregado normal

^c blocos fabricados com agregado leve

^d ensaio facultativo

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016).

O prisma composto pelas unidades e argamassa, quando sob esforços externos, sofre deformações. A diferença entre as deformações da argamassa e unidade faz com que ocorra o surgimento de tensões de tração no bloco, e sendo este de concreto, o qual tem resistência à tração menor que a resistência à compressão, origina o início de fissuração da alvenaria. Por este motivo é importante determinar a resistência à tração dos blocos. Esta resistência pode ser determinada de duas maneiras: testes diretos ou testes indiretos.

Em razão das dificuldades de realização de testes diretos em concreto, geralmente pesquisadores utilizam testes indiretos, em que o mais conhecido é o ensaio de compressão diametral.

No Brasil a NBR-7222 (ABNT, 2011) determina os métodos de ensaio para resistência à tração indireta de argamassas e concretos por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos.

A resistência à tração indireta também pode ser medida conforme norma americana ASTM C1006-84. Em que a resistência à tração por compressão diametral é medida diretamente no bloco. A resistência à tração é determinada a partir da Equação 2.0.

$$f_T = \frac{2P}{\pi LH} \quad (2.0)$$

Sendo:

f_T = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

P = Carga aplicada (KN);

L = Comprimento (mm); e

H = Altura da amostra.

O surgimento de fissuras no bloco devido à tração induzida, na alvenaria estrutural, causa uma diminuição da capacidade resistente do conjunto, onde qualquer aumento expressivo do carregamento axial pode levá-lo à ruptura, sendo assim, quanto maior a capacidade resistente do bloco à tração, maior a resistência a esforços de compressão o conjunto terá.

2.2 Propriedades da argamassa

Mohamad et al. (2017), realizaram uma pesquisa observando a resistência e comportamento de prismas de alvenaria de blocos de concreto, utilizando argamassas de diferentes resistências. Para a pesquisa os autores empregaram três tipos de argamassa, com os seguintes traços (Cimento: Cal: Areia): 1: 0,25: 3; 1: 0,5: 4,5 e 1:1: 6, sendo as resistências à compressão de 20,3; 7,4 e 4,5 MPa, respectivamente. Os autores concluíram, nesta pesquisa, que a argamassa determina como a falha da alvenaria ocorre e que a interface de contato e a interação entre bloco e argamassa é determinante para o início da falha na alvenaria.

Foram observados que quando se utilizou argamassa de maior resistência os componentes se comportaram como um material homogêneo, e com aumentando do carregamento, a principal causa de ruptura ocorreu por tração no bloco, onde as fissuras se propagaram através das juntas de argamassa desenvolvendo rupturas localizadas no contato entre bloco e argamassa. Já, quando se utilizou argamassas de menor resistência, as rupturas começaram com o esmagamento da argamassa, a qual gerou tensões de tração localizadas no bloco.

Fonseca et al. (2019), realizaram uma pesquisa experimental com o objetivo de observar a influência da resistência à compressão da argamassa sobre a resistência à compressão da alvenaria, utilizando unidades de alvenaria de concreto

de alta resistência. Três diferentes resistências à compressão da argamassa, unidade e graute foram utilizados na pesquisa.

Foram construídos prismas ocos e grauteados com diversas combinações de componentes e os resultados mostram que, relativo à argamassa, a eficiência da alvenaria com argamassa depende de muitos fatores, incluindo compatibilidade de deformação entre os componentes da alvenaria, compactação da argamassa, características de retração da argamassa, a geometria do bloco e a ligação entre a argamassa e o bloco.

Segundo Zahara e Dhanasekar (2016), a resistência da alvenaria é afetada pelo tipo de argamassa, em que o aumento da resistência da argamassa causa, somente, um leve aumento superficial na resistência à compressão da alvenaria, já a variação na espessura da junta de argamassa tem uma influência significativa na resistência da alvenaria.

Costa *et al.* (2015), cita que a resistência à compressão da argamassa tem pequena influência na resistência à compressão da alvenaria, conforme mencionado por alguns pesquisadores (IZQUIERDO, 2011; PASQUALI, 2007; JUSTE, 2001; OLIVEIRA JUNIOR, 1992).

É importante enfatizar que as conclusões de Costa *et al.* (2015) e Zahara e Dhanasekar (2016), se restringem as singularidades de suas pesquisas, pois dependendo dos critérios das análises realizadas a argamassa pode ter sim uma grande influência no comportamento de prismas utilizados na alvenaria estrutural. Segundo Izquierdo (2011), do ponto de vista econômico, não seria satisfatório utilizar argamassa com elevada resistência à compressão, sendo melhor a utilização de argamassas menos resistentes e mais deformáveis, para acomodar pequenas deformações.

Cheema e Klingner (1986), desenvolveram um modelo que relaciona o tipo de ruptura da alvenaria conforme relação de rigidez entre os materiais que constituem a alvenaria, na referida pesquisa, Cheema e Klingner, fundamentaram-se na determinação experimental de prismas confeccionados com um tipo de bloco e um tipo de argamassa, sendo que as demais proporções foram obtidas através da utilização do método numérico de elementos finitos e, a não-linearidades dos materiais foram consideradas no modelo através da utilização de módulos de elasticidade secantes para todos os materiais utilizados.

Os resultados de Cheema e Klingner (1986), determinaram um modelo de comportamento da argamassa confinada triaxialmente, onde as limitantes foram a resistência do prisma e uma curva estimada secante. Sendo o módulo de elasticidade tangente (E_{at}) da argamassa determinado em função da resistência à compressão (f_{arg}). O módulo secante (E_{as}) da argamassa foi considerado a metade do módulo tangente conforme Equações 2.1 e 2.2.

$$E_{at}=1000 \cdot f_{arg} \quad (2.1)$$

$$E_{as}=500 \cdot f_{arg} \quad (2.2)$$

Outro modelo analisado para se obter um valor para o módulo de elasticidade da argamassa relativo à resistência a compressão da mesma foi proposto por Khalaf e Fairbain (1992, citado por Mohamad 1998), em que os autores, para análise das propriedades mecânicas da argamassa estudaram três diferentes traços de argamassas, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas das argamassas obtidas do estudo de Khalaf e Fairbain (1992)

ARGAMASSA							
Traços	Resist. à compressão da argamassa	Módulo de elasticidade tangente		Módulo de elasticidade Secante *		Coeficiente de Poisson	
		Khalaf	1000. f_{arg}	Khalaf	500. f_{arg}	Tensões iniciais	Tensões finais**
1:1:6	8,0	5603	8000	3696	4000	0,26	0,40
1:0,5:4,5	14,6	10250	14600	5000	7300	0,22	0,35
1:0,25:3	25,0	14119	25000	8140	12500	0,18	0,25

Nota: * O módulo de elasticidade secante foi determinado à 2/3 da resistência à compressão do corpo de prova; ** O coeficiente de Poisson para tensões finais é aquele medido quando a argamassa está próxima da tensão de ruptura.

Fonte: Adaptado de Khalaf e Fairbain (1992).

Os resultados de Khalaf e Fairbain (1992, citado por Mohamad 1998), comparados com a estimativa do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão da mesma utilizando as Equações 2.3 e 2.4, propostas por Cheema e Klingner (1986), não mostraram uma boa aproximação, tanto para o módulo tangente quanto para o secante. Para o módulo tangente e para o módulo secante as equações que melhor se aproximaram dos resultados experimentais de Khalaf e Fairbain (1992) foram:

$$E_{at} = 600 \cdot f_{arg} \quad (2.3)$$

$$E_{as} = 340 \cdot f_{arg} \quad (2.4)$$

A resistência à compressão da argamassa, determinada através de corpos-de-prova cilíndricos, deve ser somente usada para controle de qualidade da argamassa, pois existem problemas na comparação entre as resistências reais e ensaiadas em laboratório das argamassas como o fator água/cimento, as condições de adensamento, cura, o confinamento pelos pratos da prensa, e absorção da água pelo bloco, é diferente para cada situação (MENDES, 1998).

Segundo Albertini (2009), a resistência à compressão da argamassa, para fins de assentamento, não é preponderante, dentre as demais propriedades, a mais importante, sendo somente supervisionada para que não seja um valor muito abaixo da resistência dos blocos, de modo a não prejudicar o conjunto.

Como modelo de relação entre a resistência a compressão e tração da argamassa Albertini (2009), realizou um trabalho analisando uma relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração da argamassa, sendo utilizadas dois tipos de argamassa com diferentes dosagens e foi observado que a resistência à tração das argamassas representa em média 17,40% da sua resistência à compressão.

Silva (2007), pesquisando comportamento não linear de prismas de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais utilizando o elemento finito prismático regular linear, por falta de dados experimentais para definição da resistência à tração, tanto para a argamassa, quanto para o concreto dos blocos, adotou como valor de modelagem 10% da resistência à compressão de cada material.

2.3 Prismas

Existem diversos tipos de ensaios que verificam a resistência à compressão da alvenaria, como ensaios com mini paredes (tamanho reduzido), ensaios com paredes em tamanho real, e prismas formados por dois e/ou três blocos. Baseando-se nestes ensaios, modelos teóricos de ruptura são desenvolvidos por pesquisadores.

Prismas são uma boa representação aproximada da real alvenaria, pois inclui os efeitos das propriedades dos constituintes, além da qualidade de acabamento (THAICKAVIL; THOMAS, 2018).

Por serem construídos com somente dois ou três blocos eles apresentam os benefícios de baixo custo para produção quando comparados com as paredes e mini paredes, além de serem fáceis de serem ensaiados, visto que em uma prensa de uso comum e geral para ensaios de compressão de CP_s de concreto é possível realizar os ensaios de prismas.

É necessário conhecer as características e propriedades individuais de cada componente da alvenaria, pois as características da alvenaria são relativas as propriedades individuais de cada componente.

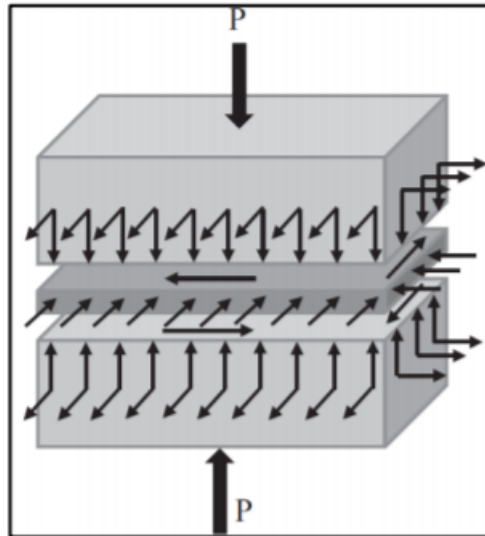
Para estabelecer estas propriedades da alvenaria, é conveniente a utilização de ensaios simples e de baixo custo. Com o objetivo de avaliar a qualidade da alvenaria em função da resistência à compressão, é comumente realizado ensaios de compressão de prismas (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

2.4 Comportamento de prismas

Segundo Pasquali (2007), a alvenaria é um elemento composto pela união de componentes heterogêneos, o que dificulta o desenvolvimento de modelos matemáticos que expliquem fielmente o seu comportamento estrutural. Vários pesquisadores têm buscado validar equações na tentativa de estabelecer teoricamente o modo de ruptura na alvenaria submetida a compressão. Os dois principais modelos que descrevem a ruptura na alvenaria sob esforços de compressão são os critérios de Hilsdorf e de Lenczner.

O critério de Hilsdorf define que a deformação lateral das paredes do bloco no prisma é governada pelo do coeficiente de Poisson; e a argamassa, por ter módulo de elasticidade menor que o bloco, tende a deformar-se mais do que o bloco, submetendo-o a tensões de tração induzidas. Como o bloco é impedido de se deformar devido à aderência entre os blocos e a argamassa surgem também tensões de compressão na argamassa conforme Figura 2.1.

Figura 2.1 – Estado de tensões atuantes nos blocos e nas juntas de argamassa



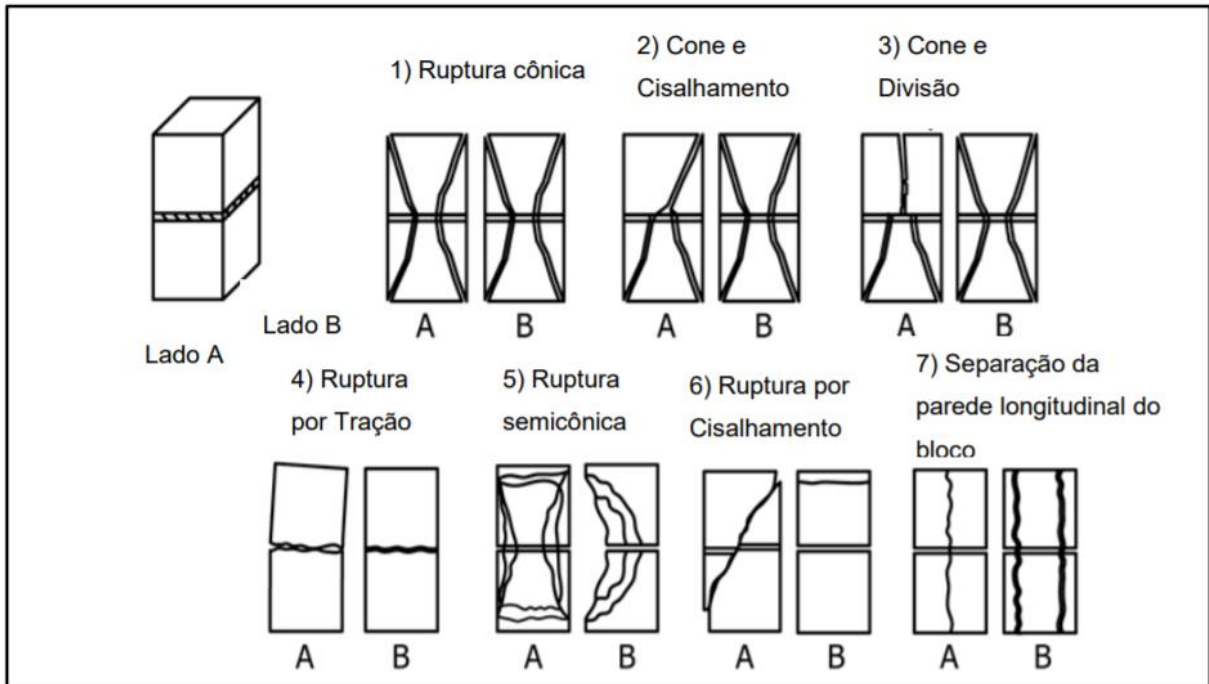
Fonte: Zahara e Dhanasekar (2016) adaptada de Bortoletto (2020).

O critério de Lenczner, considera a contribuição da argamassa de assentamento na resistência da alvenaria, baseando-se na compatibilidade de deformações entre os elementos bloco e argamassa, ou seja, a argamassa, por ter um módulo de elasticidade menor que o bloco, fica submetida a esforços de compressão e os blocos, a esforços de tração, ocorrendo a ruptura por tração no bloco.

Verifica-se que ambos os critérios são semelhantes, assumem as mesmas hipóteses, onde Hilsdorf se baseia nas tensões, e Lenczner se baseia na incompatibilidade de deformações (GOMES, 1974).

A ASTM 48 C1314 (ASTM, 2018), apresenta formatos de rupturas de prismas ilustradas na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Modo de ruptura dos prismas



Fonte: ASTM C1314.

Na pesquisa realizada por Bortoletto (2020), o modo de ruptura dos prismas ocorreu de forma frágil, apresentando fissuras na posição vertical, com início próximo à região da argamassa e partindo em direção ao bloco, em decorrência do estado triaxial de tensões.

Albertini (2009), realizando ensaios experimentais em prismas não grauteados obteve fissuras paralelas à direção do carregamento em sua pesquisa.

Segundo Cheema e Klingner (1986 citado por Mohamad 1998, p. 28), os modos de ruptura dos prismas não grauteados são:

- Tração no bloco, onde a tensão de tração principal no bloco é maior que a resistência à tração do bloco; e
- Esmagamento do bloco, onde a tensão principal de compressão no bloco é maior que a resistência à compressão do bloco.

Os mesmos autores forneceram uma relação para a ruptura do bloco relacionando os módulos de elasticidade da argamassa (E_{arg}) e do bloco (E_{bl}), em que o modo de ruptura ocorre preferencialmente pôr tração no bloco ou esmagamento da argamassa. A relação é mostrada nas Equações 2.5 e 2.6.

$$\frac{E_{arg.}}{E_b} > 0,66 - \text{Ruptura por esmagamento da argamassa} \quad (2.5)$$

$$\frac{E_{arg.}}{E_b} < 0,66 \rightarrow \text{Ruptura por tração no bloco} \quad (2.6)$$

Fazendo uma análise paralela do comportamento de ruptura nos prismas de alvenaria com as concentrações de tensão na mesma, pode-se recorrer ao trabalho de Gisbert *et al.* (2018), no qual os autores realizaram uma pesquisa com o objetivo principal de utilizar elementos tridimensionais de alta ordem, operando o software ANSYS, para modelagem numérica de estruturas de alvenaria, analisar o comportamento da resistência à compressão uniaxial e diagonal em paredes de tijolos.

Os modelos de elementos finitos foram criados e calibrados a partir dos resultados dos ensaios experimentais. O micromodelo numérico utilizou elementos tridimensionais não lineares hexaédricos de 8 e 20 nós para representar tijolo e argamassa, como solid185 e solid186.

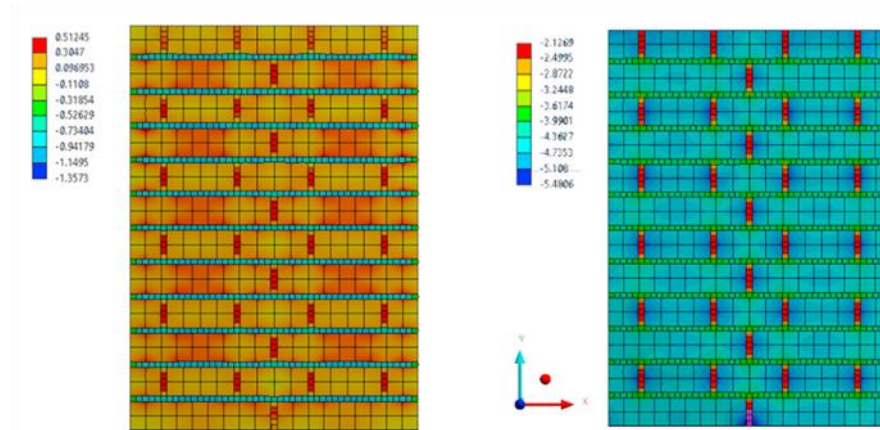
A superfície de ruptura foi definida conforme modelo de ruptura Drucker - Prager e Rankine adicionando um comportamento linear de endurecimento-amolecimento-dilatação. Além disso, zonas coesivas baseadas em energias de fratura foram adicionadas aos contatos entre argamassa e tijolos, a fim de permitir a ruptura por descolamento entre esses dois materiais.

Analizando os resultados numéricos de Gisbert *et al.* (2018), as tensões principais em Y podem ser detectadas nos contatos entre juntas verticais de argamassa e tijolos devido à diferença de tensões entre os dois materiais, o que é causado pela diferença de sua deformabilidade, ou seja, módulos de elasticidade diferentes. Além disso, pôde-se observar como as juntas horizontais de argamassa sob os tijolos são muito mais tensionadas que as verticais.

Em relação à direção X, uma tensão crescente pode ser observada à medida que a argamassa se aproxima da borda lateral da amostra devido ao efeito de Poisson, que é maior neste material do que nos tijolos. Esse comportamento de expansão introduz tensões de tração nas juntas verticais e na parte central dos tijolos, causando a ruptura final da amostra.

A Figura 2.3 mostra os resultados das concentrações de tensões de compressão em Y e X respectivamente.

Figura 2.3 – Tensão de compressão axial em Y (esquerda) e X (direita) - (MPa)

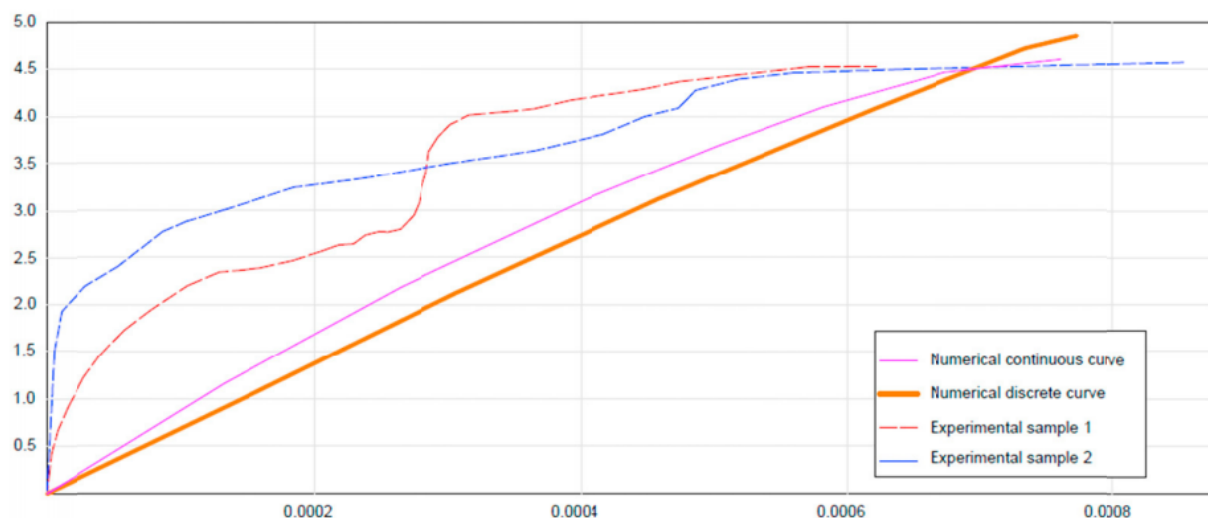


Fonte: Gisbert *et al.* (2018)

Com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os numéricos Gisbert *et al.* (2018) desenvolveu um modelo contínuo adicional utilizando na modelagem a mesma geometria e materiais equivalentes do modelo discreto para assim poder observar a melhor técnica de modelagem em seu trabalho.

A Figura 2.4 mostra o gráfico da curva tensão vs deformação e a comparação entre as soluções numéricas e experimentais nas análises realizadas por Gisbert *et al.* (2018).

Figura 2.4 - Gráfico da curva tensão vs deformação e a comparação entre as soluções numéricas e experimentais



Fonte: Gisbert *et al.* (2018)

Nos estudos de Bortoletto (2020), o qual utilizou argamassa em todo o contato entre os blocos, o modo de ruptura ocorreu com geração de tensões de tração nas faces laterais horizontais em prismas.

2.5 Geometria de blocos vazados

Casali *et al.* (2012), analisaram a influência da geometria de blocos vazados de concreto e do tipo de argamassa na relação prisma / bloco e no comportamento de deformação e modo de ruptura dos prismas.

Duas geometrias de blocos de concreto foram avaliadas, uma com espessura da parede de 25 mm e a outra com espessura de parede de 32 mm e relação área líquida / área bruta das unidades de 0,56 e 0,66 e a resistência à compressão dos blocos foi de 37,2 e 33,8 MPa respectivamente.

Os autores concluíram que a geometria dos blocos influenciou no comportamento mecânico das unidades e afirmaram que utilizando blocos com espessura de parede de 32 mm, aumentou em cerca de 15% o peso dos blocos em relação aos blocos com espessura de parede de 25 mm, sobrecarregando as fundações dos edifícios e a produtividade também diminuiu.

Boult (1979), estudando prismas de concreto, observou que a espessura do septo parece não influenciar na resistência do prisma e que furos mais paralelos produzem melhor resistência que os afunilados, concluindo que a geometria do furo é uma variável importante na resistência da alvenaria, considerando que afunilamento dos vazados dos blocos favorecem a deformação do bloco.

Shrive (1983), pesquisando a ruptura da alvenaria e as distribuições de tensões define que a busca por uma geometria adequada é muito importante para se obter um melhor desempenho do bloco e da alvenaria. Definindo que ocorre vantagens em aumentar a espessura dos septos e reduzir o afunilamento e alinhar os vazados do bloco.

Bortoletto (2020), em sua pesquisa, estudando seis diferentes geometrias define que a geometria influencia na resistência à compressão dos prismas, onde prismas com formato geométrico hexagonal, de menor área líquida, obteve maior resistência em relação aos prismas com formato retangular com maior área líquida. E ainda obteve uma relação entre as resistências à compressão de 37,31% para

prismas com o mesmo formato circular, em que a diferença estava nas espessuras das paredes e septos.

3 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

Os modelos constitutivos dos materiais têm relação conforme comportamento mecânico frente a esforços internos. Os modelos, devido a esses comportamentos podem ser descritos resumidamente como elástico, plástico ou viscoso.

O estudo do comportamento de uma estrutura está relacionado, principalmente, as equações constitutivas dos materiais que a compõem. As Tais equações relacionam as tensões, deformações e o tempo (GUERRA, 2017).

Considerando um ensaio uniaxial de tração, onde $\sigma_1 > 0$, e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, ou um ensaio uniaxial de compressão, onde $\sigma_3 < 0$, e $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, o diagrama de tensão deformação será plotado, referente as tensões principais axiais (σ_1), ou (σ_3), as deformações principais (ε_1), ou (ε_3), as quais proporcionam uma representação útil do comportamento elástico e plástico de uma material (CHEN; HAN, 1988).

3.1 Modelo elástico

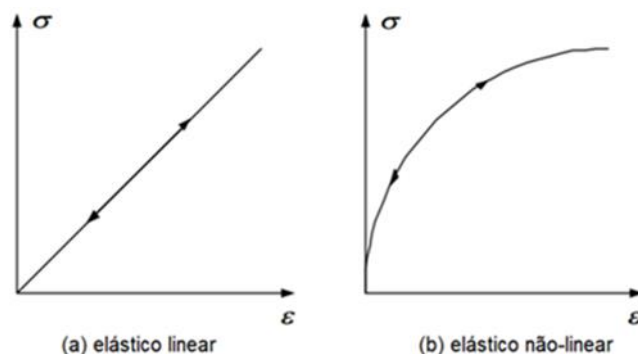
A teoria da elasticidade define que todos os sólidos se deformam quando são submetidos a esforços externos e que cada sólido tem limites de solicitações, sem se deformar permanentemente, antes da retirada da carga.

Quando o material possui as propriedades da elasticidade linear a sua curva tensão vs deformação é proporcional. Portando define-se que a derivada das tensões em relação às deformações não varia no caso elástico linear, porém quando comportamento e plástico não lineares, essa relação varia conforme o nível de deformações aumenta (GUERRA, 2017).

O comportamento elástico linear de um material se caracteriza pela proporcionalidade na relação entre tensão deformação e considerando a região da proporcionalidade do material neste intervalo o material se comporta como material elástico linear (TIMOSHENKO, 1983).

A Figura 3.1 mostra o diagrama da curva tensão vs deformação para o modelo linear elástico (a) e não linear elástico (b).

Figura 3.1 – Relações constitutivas elásticas: (a) Comportamento elástico linear e (b) Comportamento elástico não-linear



Fonte: Adaptado de Filho (2003).

Em uma análise linear, deve-se considerar a manutenção da geometria inicial, que é linearidade geométrica, e das propriedades físicas, que é a linearidade física, específicas do material como referência no equilíbrio do sistema (ALBERTINI, 2009).

Sinha e Hendry (1979), estudando a ruptura em mini paredes de tijolos maciços cerâmicos observaram um comportamento linear da alvenaria quando sob tensão de até 90% da carga de ruptura da alvenaria.

Peleteiro (2002), realizou um levantamento bibliográfico sobre a utilização de diversos modelos de modelagem numérica para a simulação do comportamento da alvenaria estrutural. Para análises de estruturas submetidas a baixos níveis de tensão é possível a utilização de modelo discreto com comportamento linear e material isotrópico.

Capuzzo (2000), pesquisando condições de início do comportamento não linear para dois modelos de alvenaria, obteve em suas análises valores próximos para ambos os regimes analisados. Em média a não linearidade ocorreu a 75% da carga de ruptura, o mesmo valor recomendado por Hendry *et al.* (1981) concluindo que para carregamentos verticais a não linearidade da alvenaria se dá aproximadamente a 20% da carga de ruptura.

Na pesquisa de Bortoletto (2020), foi observado um comportamento linear até o início das fissuras nos prismas ensaiados à compressão e a relação entre a carga da primeira fissura até a carga máxima de ruptura foi de 77,50% para o prisma PGC-1, 85,09% para o prisma PGC-2, 80% para o prisma PGH1, 79,38% para o prisma PGH-2, 70% para o prisma PGR-1 e 83,48% para o prisma PGR-2, sendo esses

valores perto da perda de linearidade encontrado por Hendry et al. (1981) e Capuzzo (2000), ambos sendo alvenaria cerâmica.

O modelo discreto com o comportamento linear e isotrópico se caracteriza por bons resultados em estruturas submetidas a baixos níveis de tensões, porém não é adequado para altos níveis de tensão ou onde é necessária uma análise de redistribuições de tensões (PELETEIRO, 2002).

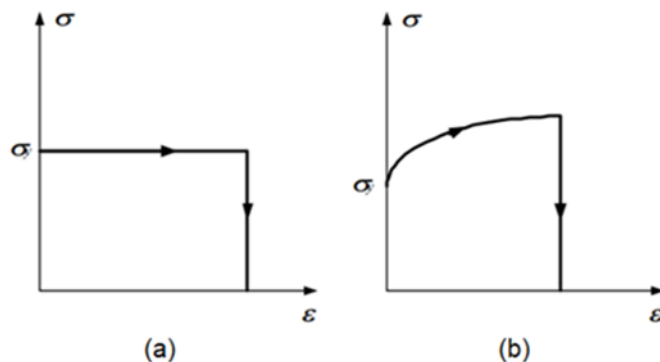
3.2 Modelo plástico

Conforme Guerra (2017), o comportamento plástico do material é caracterizado, principalmente, pela não reversibilidade de deformações após a retirada da carga. Ao se ultrapassar o limite elástico do material, inicia o surgimento das chamadas deformações plásticas.

O corpo fica, portanto, com deformação permanente a partir da tensão de escoamento, após a retirada da carga apresenta um comportamento plástico. Esse comportamento ocorre mais acentuadamente em materiais dúcteis e é provocado por um rearranjo na estrutura cristalina do material

A Figura 3.2 apresenta o comportamento plástico perfeito e o comportamento plástico com endurecimento. A plasticidade perfeita representa um comportamento onde após início da plasticidade o material perde sua total rigidez e capacidade resistiva, já a plasticidade com endurecimento é caracterizada pelo aumento de sua rigidez e da resistência do material a tensões maiores que a tensão de escoamento.

Figura 3.2 – Relações constitutivas plásticas: Comportamento plástico perfeito (a) e Comportamento plástico com endurecimento (b)



Fonte: Adaptada de Campos Filho (2003)

3.3 Critérios de escoamento dos materiais

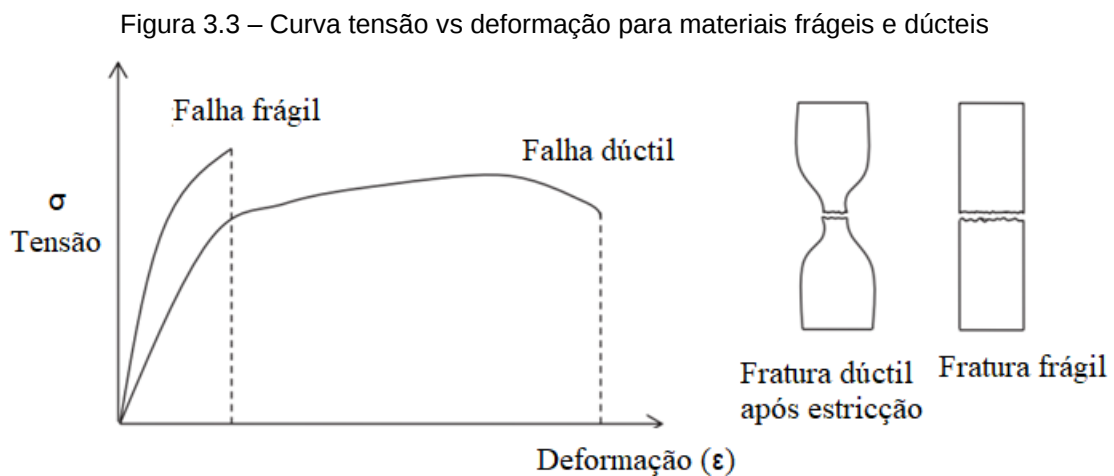
No ANSYS, quando se analisa os critérios do escoamento de um material, um dos parâmetros analisados é o FS. A magnitude definida pelo software do FS varia de 15 a 0, onde FS igual a 15 a estrutura está condicionada a uma maior segurança e 0 a uma menor segurança.

O escoamento ou falha de um elemento está condicionado a FS menor que 1, ou seja, 1 é o valor unitário adimensional limite, qualquer valor menor que 1 representa que a estrutura está na iminência de fissurar, escoar ou chegar à ruptura total e quanto menor for este fator mais frágil sua estrutura se apresenta.

Para a determinação do FS quatro diferentes modelos de falhas e escoamento são utilizados, sendo dois para materiais dúcteis e dois para materiais frágeis. Sob condições de carregamento estático, a falha do material pode ocorrer quando uma estrutura é tensionada além do limite elástico.

Os tipos de falhas que um material pode sofrer são as falhas do tipo frágil e dúctil. A diferença entre as falhas do tipo frágil e dúctil é a quantidade de deformação plástica que o material apresenta antes da fratura. Quando dúcteis apresentam deformações plásticas extensas antes do material romper, quando frágeis a ruptura ocorre abruptamente.

A Figura 3.3 ilustra a diferença para as curvas de tensão vs deformação no comportamento de falha frágil e dúctil.



Fonte: Adaptada e modificada de Chen e Liu (2015)

3.3.1 Critério da tensão de Von Mises

A Teoria da Tensão Equivalente ou “Tensão de Von Mises”, utilizada para análises de materiais dúcteis, a qual se caracteriza quando um elemento se encontra sujeito a uma tensão σ , enuncia que objeto armazena energia interna. Esta é denominada Densidade de Energia de Deformação (energia por unidade de volume do material), e se a tensão for uniaxial, essa densidade é expressa conforme Equação 3.1.

$$u = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (3.1)$$

Considerando um elemento de volume do material submetido ao estado triaxial de tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), a Equação 3.1 representada pela Tensão equivalente (σ_e) será:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

3.3.2 Critério do escoamento de Tresca

O segundo critério de falha para materiais dúcteis é a Teoria da Tensão de Cisalhamento Máximo (τ_{max}) ou Critério do Escoamento de Tresca, em que a falha ocorre devido a tensão de cisalhamento.

A teoria da tensão de cisalhamento máximo é utilizada para falha dúctil quando a tensão de cisalhamento τ_{max} excede a metade da tensão de escoamento do material σ_E . Para este fator utiliza-se o círculo de Mohr, definindo o fator de segurança a partir da Equação 3.3.

$$\tau_{max} \leq \sigma_E / 2 \quad (3.3)$$

Onde:

σ_E é determinada por um teste de tração simples.

Considerando a condição de que duas tensões principais no plano tenham o mesmo sinal a tensão máxima de cisalhamento é expressa pela Equação 3.4.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}}{2} \quad (3.4)$$

Na condição de que as tensões principais no plano tenham sinais opostos a tensão máxima de cisalhamento é expressa pela Equação 3.5.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.5)$$

Onde:

σ_1 = Tensão máxima (σ_{max}) – Tração; e

σ_3 = Tensão máxima (σ_{min}) – Compressão.

Para materiais frágeis o Ansys considera duas Teorias: A Tensão Normal Máxima (σ_1) ou Critério de W. Rankine e a Tensão de Mohr-Coulomb

3.3.3 Critério de W. Rankine

O critério da Tensão Normal Máxima, σ_1 , ou Critério de W. Rankine explica a ruptura frágil por tração que ocorre em materiais frágeis. Para segurança da estrutura se considera que a máxima tensão de tração no material não pode ultrapassar o valor resistência última à tração do material (σ_{ut}).

Neste critério as tensões principais no plano consideram que a tensão de tração do material σ_1 é igual a tensão de compressão σ_3

O critério de Rankine também é chamado de critério da máxima tensão de tração e pode ser expresso por:

$$-\sigma_{uc} < \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\} < \sigma_{ut} \quad (3.6)$$

Em que:

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais;

- σ_{uc} e σ_{ut} são as resistências últimas à compressão e à tração respectivamente;

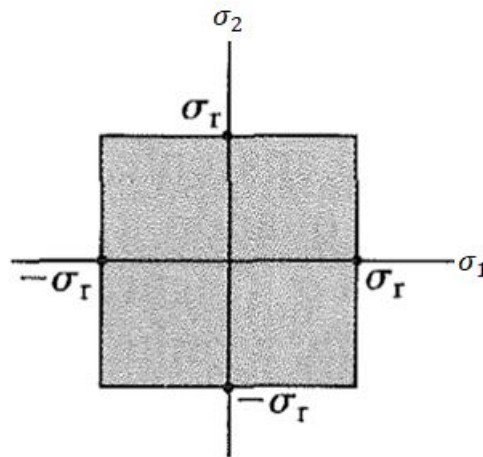
Para o estado plano de tensão o limite de falha exige que:

$$|\sigma_1| = \sigma_r$$

$$|\sigma_2| = \sigma_r$$

Para evitar falhas frágeis, as tensões principais em qualquer ponto da estrutura devem estar dentro da envoltória de falha ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Diagrama de falha para a teoria da tensão normal máxima (tensão plana)



Fonte: Adaptada de HIBBLER (2007)

3.3.4 Critério de Mohr–Coulomb

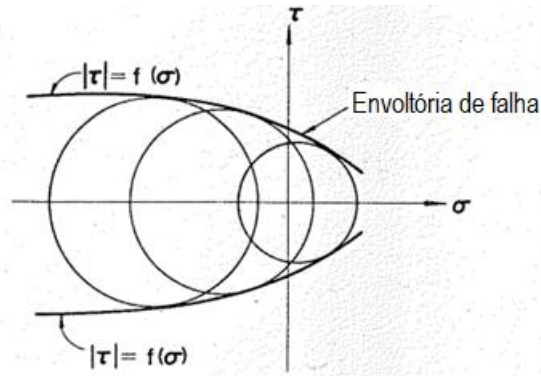
O critério de Mohr–Coulomb é baseado na suposição de que a tensão de cisalhamento máxima é a tensão limite de ruptura. Ele considera que a tensão limite de cisalhamento τ no plano seja igual a uma função da tensão σ normal em um ponto no mesmo plano conforme Equação (3.7)

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (3.7)$$

$f(\sigma)$ = Função determinada experimentalmente.

Considerando a representação gráfica da envoltória ilustrada na Figura 3.5, o critério de Mohr-Coulomb sugere que a ruptura ocorrerá quando o raio do maior círculo principal tangenciar a função $f(\sigma)$.

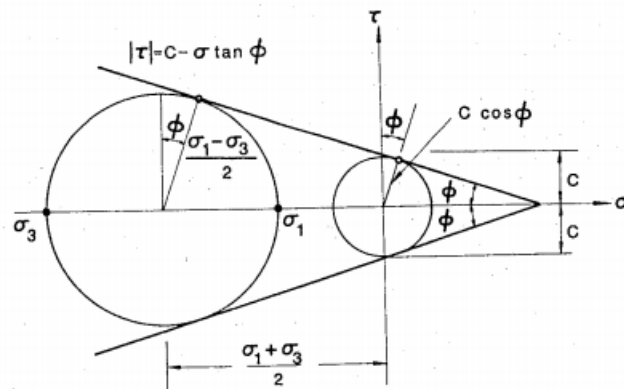
Figura 3.5 – Representação do Critério de Mohr-Coulomb



Fonte: Adaptado e modificado de Chen e Han (1988)

A forma mais simples da envoltória de falha do critério de Mohr é uma linha reta ilustrada conforme Figura 3.6.

Figura 3.6 - Critério de Mohr-Coulomb – Superfície de envoltória de ruptura.



Fonte: Adaptado de Chen e Han (1988).

E a forma simples de equação para linha reta de envoltória de ruptura do critério de Mohr será conforme Equação (3.8).

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (3.8)$$

c = fator de coesão, constante determinada experimentalmente; e

ϕ = ângulo de atrito interno do material, também é uma constante determinada experimentalmente.

Considerando a Equação (3.8) e reescrevendo ela em termos das tensões principais $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ tem-se a Equação (3.9).

$$\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi = c - \left[\frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \right] \tan \phi \quad (3.9)$$

Reescrevendo a Eq. (3.9) em função de σ_1 e σ_3 tem-se:

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad (3.10)$$

Sendo:

$$\frac{1}{f'_c} = \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{f'_t} = \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} \quad (3.12)$$

Onde:

f'_c = resistência à compressão simples; e

f'_t = resistência à tração simples.

Substituindo as Equações (3.11) e (3.12) na Eq. (3.10) em termos das tensões principais $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ te:

$$\frac{\sigma_1}{f'_t} - \frac{\sigma_3}{f'_c} = 1 \quad (3.13)$$

Considerando a condição de que a resistência última à tração (f'_t) do material seja diferente da resistência última à compressão (f'_c) a teoria de Mohr–Coulomb prevê falhas no material comparando o valor máximo de tensão principal

(σ_1) com a resistência última à tração (f'_t) e a tensão mínima principal (σ_3) com a resistência última à compressão final (f'_c).

O Ansys para obter o (FS), para a condição de falha do material, utiliza Equação 3.14 e quando considera a condição para o início de fissuração do material utiliza a Equação 3.15.

$$\frac{\sigma_1}{f'_{ut}} + \frac{\sigma_3}{f'_{uc}} \leq 1 \quad (3.14)$$

Ou:

$$\frac{\sigma_1}{f'_{yt}} + \frac{\sigma_3}{f'_{yc}} \leq 1 \quad (3.15)$$

Onde:

1 é o valor mínimo para o limite de ruptura, ou início de fissuração;

f'_{ut} é a resistência última de tração;

f'_{uc} é a resistência última de compressão;

f'_{yt} é a resistência ao escoamento à tração do material; e

f'_{yc} é a resistência ao escoamento à compressão do material.

3.3.5 Critério de Drucker-Prager

A partir de um estado multiaxial de tensões, considerando uma função $[F]$ relativa às tensões principais ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$) o critério de ruptura de um material pode ser expresso conforme critério de Drucker-Prager.

Na Equação 3.16, é possível analisar, a partir da função F , como se comporta a superfície de ruptura S do concreto, fundamentada no critério de ruptura clássico de Drucker-Prager.

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (3.16)$$

Em que:

S é a superfície de falha e é definida pelas tensões principais e outros cinco parâmetros (f_c, f_t, f_{cb}, f_1 e f_2)

Onde:

$$f_{cb} = 1,2 f_c$$

$$f_1 = 1,45 f_c$$

$$f_2 = 1,725 f_c$$

F é uma função que transforma as tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) em uma tensão equivalente, é a função do estado de tensões principais ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$);

f_c é a resistência uniaxial última à compressão;

f_t é a resistência uniaxial última à tração; e

$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$ são as tensões principais nas direções principais.

A fissuração, em um elemento sob esforços externos, pode acontecer em até três direções ortogonais, de forma que uma fissura pode se desenvolver em um plano e se uma subsequente tensão, tangencial à face da fissura, for grande o bastante, uma segunda ou terceira fissura vai se desenvolver.

No Critério de Drucker-Prager a fissuração irá ocorrer quando a Equação 3.16 for satisfeita. Se alguma tensão principal for de tração surgirá a fissuração, caso todas as tensões principais forem de compressão acontecerá o esmagamento do elemento.

Tanto $[F]$ e $[S]$ são expressas em termos das tensões principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), onde σ_1 é a tensão máxima ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$) e a σ_3 é a tensão mínima ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$) tendo por convenção $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ a ruptura do material é definida em quatro domínios, os quais são:

1. $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (compressão/compressão/compressão);
2. $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (tração/ compressão / compressão);
3. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (tração/tração/ compressão); e
4. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (tração/tração/tração).

Considerando o prisma sob domínio de tração – tração – compressão assume-se que a função do estado de tensões principais (F), fica definida conforme Equação 3.17 e a superfície de ruptura (S), fica definida conforme Equação 3.18.

$$F = F_3 = \sigma_i; i = 1, 2. \quad (3.17)$$

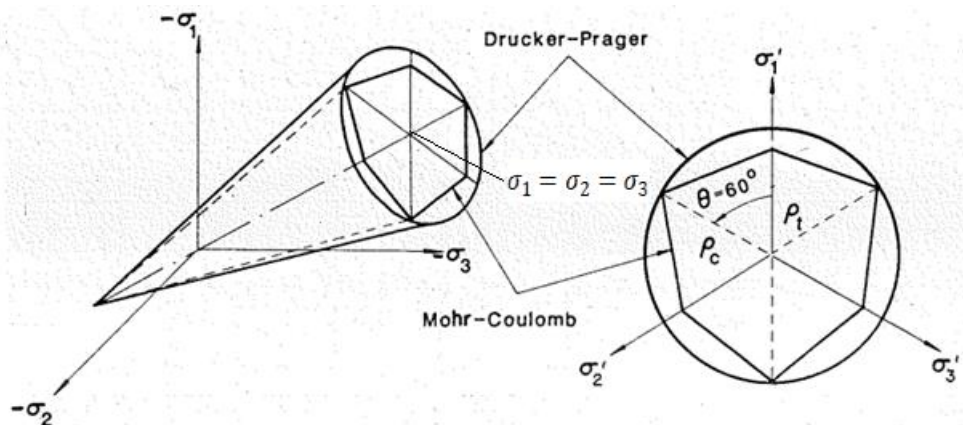
e;

$$S = S_3 = \frac{f_t}{f_c} \left(1 + \frac{\sigma_3}{f_c} \right) \quad (3.18)$$

Se o critério de falha para a função F , em que a σ_i para ambos $i = 1, 2$ forem satisfeitos, ou seja quando a condição para σ_1 e σ_2 forem satisfeitas a fissuração ocorrerá nos planos perpendiculares às tensões principais σ_1 e σ_2 . Se o critério de falha for satisfeito apenas para $i = 1$, a fissuração ocorrerá apenas no plano perpendicular à tensão principal σ_1 .

O gráfico tridimensional da superfície de falha, relativo as tensões principais, é apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Superfície de falha no espaço tridimensional das tensões principais

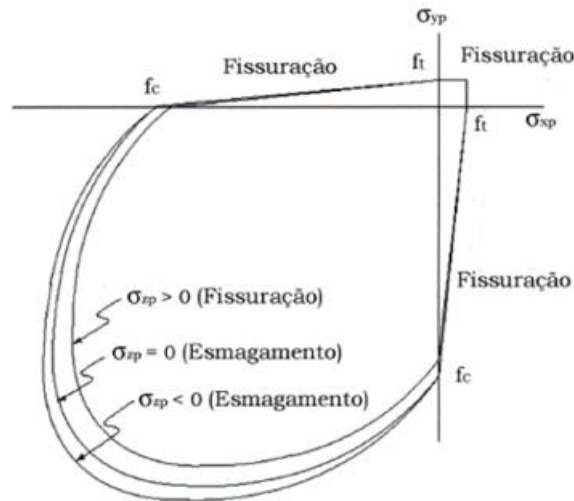


Fonte: Adaptada de CHEN e HAN (1988).

Considerando, portanto, o eixo Z como o eixo de aplicação de uma tensão de compressão $\sigma_{zp} = \sigma_3$ e o surgimento de tensões de tração nos eixos X e Y com as tensões $\sigma_{xp} = \sigma_1$ e $\sigma_{yp} = \sigma_2$, as fissuras, caso a condição de $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ seja satisfeita, ocorrerão perpendiculares às tensões de tração no bloco.

A Figura 3.8 expõe a representação da superfície de ruptura em duas dimensões, tanto para condições de fissuração, quanto condição de esmagamento.

Figura 3.8 - Superfície de ruptura em duas dimensões

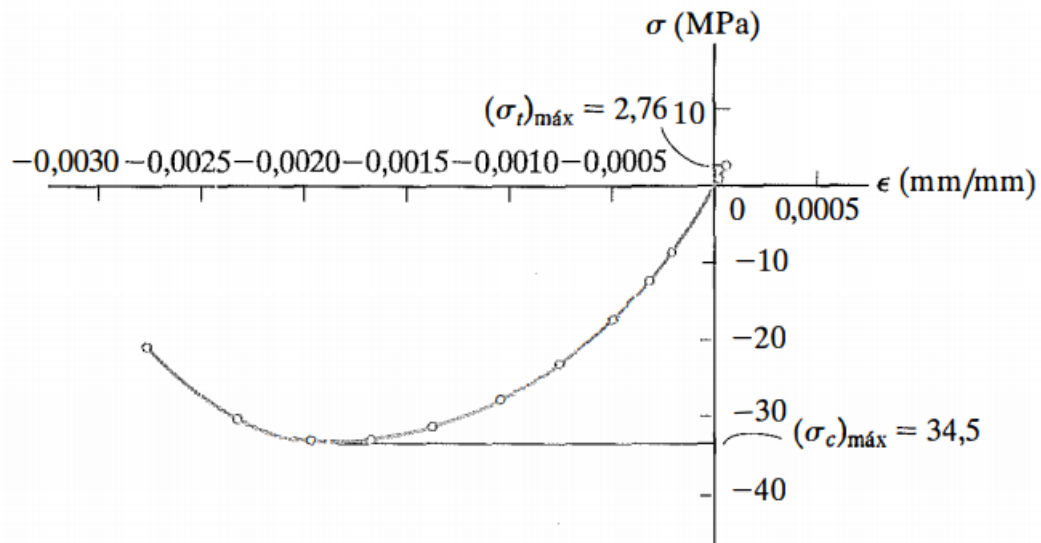


Adaptada do Manual do ANSYS.

3.4 Comportamento do concreto

O concreto é classificado como um material frágil de baixa de resistência à tração. Seu diagrama tensão deformação depende, principalmente, da mistura do concreto (água, areia, brita e cimento), do tempo e temperatura de cura.

A Figura 3.9 apresenta um diagrama tensão deformação completo para o concreto de uso comum. Observa-se nessa figura que a máxima resistência à compressão máxima $(\sigma_c)_{máx}$ do concreto é quase 12,5 vezes maior do que sua resistência à tração máxima $(\sigma_t)_{máx}$ (HIBBELER, 2010).

Figura 3.9 – Diagrama σ - ϵ para concreto de mistura típica

Fonte: Hibbeler (2010)

Segundo Peleteiro (2002), o concreto apresenta uma baixa resistência à tração e uma alta resistência à compressão, tem como modelo de ruptura um comportamento descrito como de material frágil, prevendo ruptura por fissuras ou esmagamento, considerando a fissuração, em zonas tracionadas, e esmagamento, em zonas comprimidas.

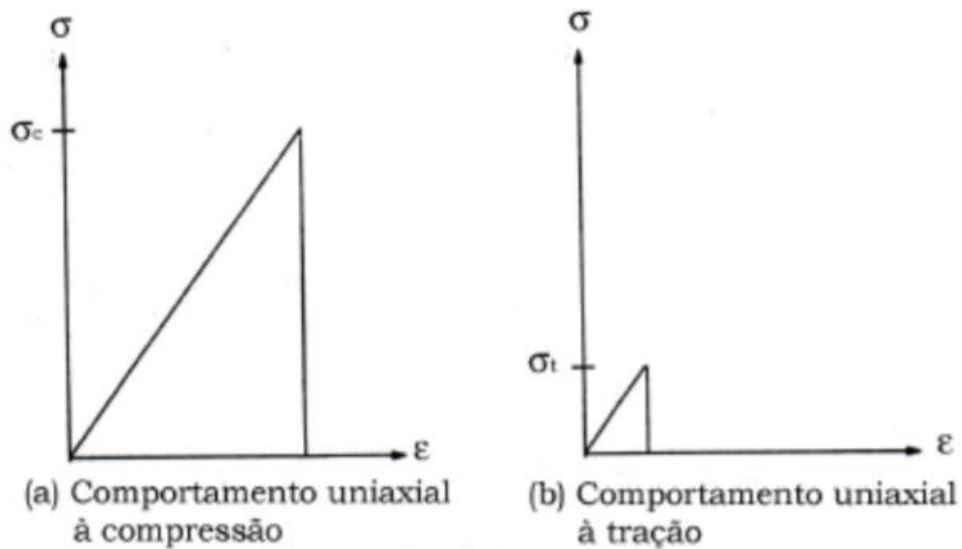
A fissuração no concreto é representada por um modelo de fissuras dispersas, as quais ocorrem quando a superfície de ruptura é alcançada por tensões de tração na direção normal a face de ruptura em um plano de menor resistência, geralmente em um ponto de concentração de tensão.

Os modelos de ruptura são utilizados para avaliar a possibilidade de ruptura de um material. Podendo a análise ser feita no plano, casca e/ou sólido obtendo a tensão de falha de um material (PELETEIRO, 2002).

3.4.1 Comportamento do concreto – Estado Uniaxial

Conforme Peleteiro (2002), o modelo de ruptura do concreto considera que o material rompe completamente assim que atinge a carga máxima, e, até o ponto de ruptura, se comporta no regime elástico linear. Gráficamente o comportamento, para o caso uniaxial, é representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Comportamento uniaxial do modelo para materiais frágeis



Fonte: Peleteiro (2002)

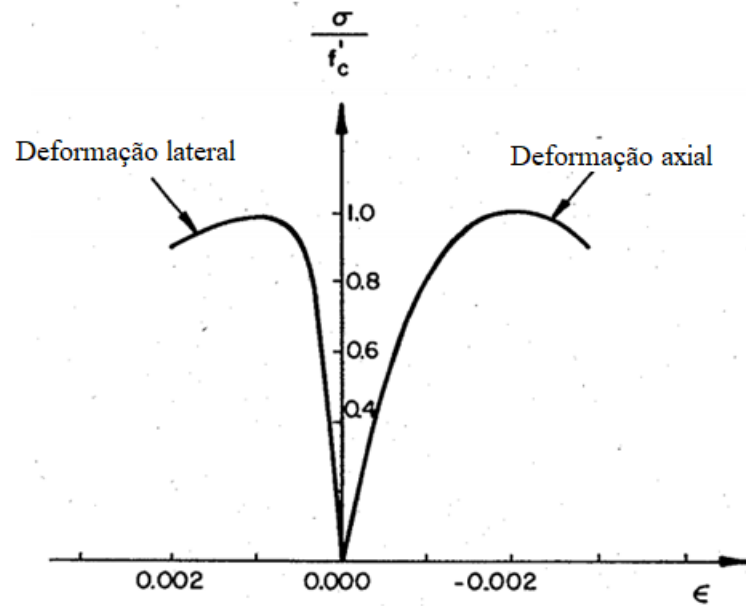
O diagrama tensão deformação para o concreto comum, sob compressão uniaxial, apresenta três estágios de comportamento. O primeiro estágio consiste em um comportamento linear elástico que se aproxima de uma solicitação até cerca de 30% da tensão máxima de compressão (f_c), neste estágio, a rachadura existente antes do carregamento permanece quase inalterada.

O segundo estágio vai de 30 a 75% de (f_c), em que as fissuras começam a aumentar em número, comprimento e largura. A fratura do concreto se inicia devido, primeiramente, à formação de fissuras junto aos agregados, com o aumento das fissuras a não linearidade do concreto se torna mais evidente, porém estáveis, portanto, a tensão igual a 0,75 (f_c) seria o início da propagação das fissuras instáveis.

O terceiro estágio ocorre com a falha progressiva do concreto quando se inicia frestas através da matriz argamassa. Essas frestas se ligam as fissuras próximas aos agregados e criam zonas internas com microfissuras. Para a tração uniaxial do concreto o limite de elasticidade observado, na curva tensão deformação, fica em torno de 60% a 80% da tensão resistência última do concreto (CHEN E HAN, 1988).

A Figura 3.11 - mostra o comportamento do concreto sob compressão uniaxial.

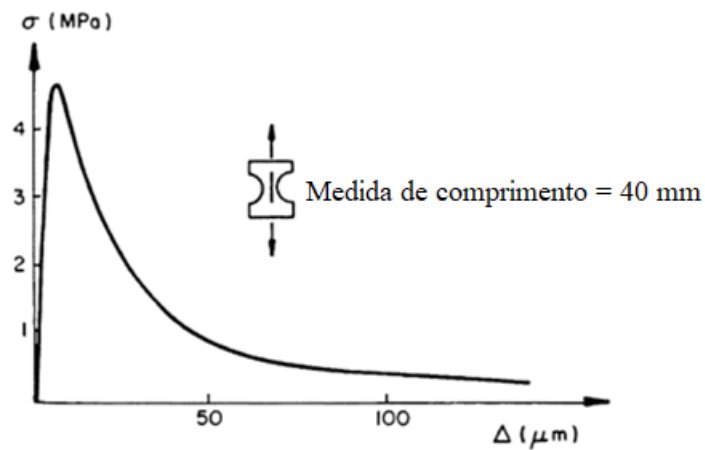
Figura 3.11 - Curva tensão deformação típica para compressão uniaxial



Fonte: Adaptado e modificado de Kupfer et al. (1969).

A Figura 3.12 mostra o comportamento do concreto sob tração uniaxial.

Figura 3.12 – Tração uniaxial do concreto



Fonte: Adaptada e modificada de Peterson, (1981)

Na Figura 3.13 apresenta a curva tensão deformação para o concreto típico sob compressão e tração uniaxial para a falha do concreto simples.

A modelagem numérica do material dentro do modelo de endurecimento pode ser feita através do endurecimento isotrópico, a partir dos dados obtidos experimentalmente, tendo a possibilidade de modelar o material com o Endurecimento Isotrópico Multilinear e Endurecimento Isotrópico Bilinear.

3.5.1 Endurecimento isotrópico

A regra de endurecimento de um material sob esforços descreve a mudança da superfície de escoamento do material através de um escoamento progressivo, e a partir deste escoamento os estados de tensão para o escoamento subsequente do material podem ser estabelecidos. O critério de escoamento para muitos materiais depende do histórico de carregamento e da evolução da deformação plástica.

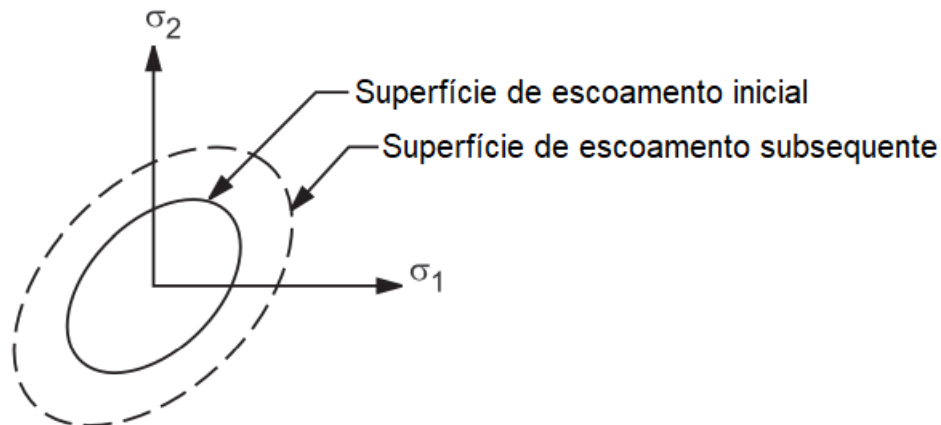
Existem dois modelos disponíveis de endurecimento, o Endurecimento Isotrópico e o Endurecimento Cinemático. No endurecimento isotrópico, a superfície de escoamento expande uniformemente com a deformação plástica, resultando em um aumento na rigidez e resistência do material, consequentemente de seu limite elástico.

As deformações irreversíveis em um material, decorridas de esforços instantâneos irreversíveis, são as deformações plásticas que são geradas instantaneamente, independente do tempo, e são definidas dentro do Ansys como Rate-Independent Plasticity. O conceito da plasticidade independente pode ser utilizado, supondo que as deformações plásticas no material, se desenvolvam instantaneamente.

Dentro do conceito de plasticidade independente e do modelo de endurecimento isotrópico, existem quatro modelos constitutivos que podem prever o comportamento plástico do material, o modelo bilinear, o multilinear, o não-linear, e o modelo de recuperação estática de endurecimento isotrópico.

Para materiais com comportamento isotrópico plástico a Figura 3.14 apresenta graficamente as superfícies de escoamento inicial e subsequente.

Figura 3.14 – Endurecimento isotrópico



Fonte: Adaptado Ansys release 12.0 (2009).

A mudança no critério de escoamento devido ao carregamento é chamada de endurecimento. O comportamento de endurecimento resulta em um aumento na tensão de escoamento mediante a um carregamento adicional na superfície de escoamento do material, de modo que, um aumento na tensão é acompanhado por um aumento na deformação plástica.

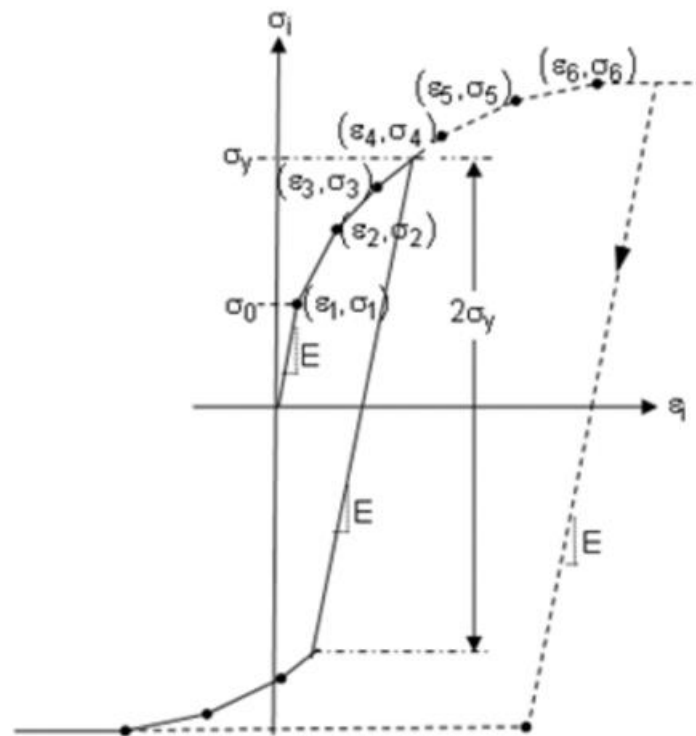
3.5.2 Endurecimento Isotrópico Multilinear

O comportamento atribuído ao material através do modelo de Endurecimento Isotrópico Multilinear são os dados obtidos, experimentalmente, através da curva de dispersão para as relações de tensão deformação, onde todas os pontos das curvas de tensão vs deformação do material são utilizadas para descrever seu comportamento numericamente

A partir dos dados obtidos através de ensaios experimentais, o comportamento plástico do material é descrito por uma curva tensão deformação, em que o primeiro ponto que descreve esse comportamento, σ_0 na Figura 3.15, corresponde à tensão de escoamento do material e os pontos subsequentes definem as respostas plásticas do material.

A Figura 3.15 representa graficamente o histórico da curva tensão deformação e as inclinações instantâneas do material.

Figura 3.15 – Histórico dos módulos de elasticidade inicial e da fase plástica instantâneos



Fonte: ANSYS Mechanical APDL Material Reference (2013)

3.5.3 Endurecimento Isotrópico Bilinear

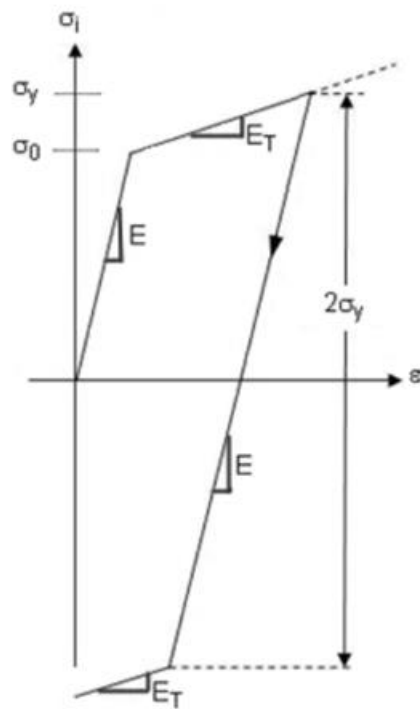
Como já descrito o modelo de endurecimento Isotrópico Bilinear é semelhante ao modelo Multilinear, porém ele não compreende todo o histórico de comportamento do material. O endurecimento isotrópico bilinear é descrito por uma curva de tensão deformação, em que os coeficientes necessários para caracterização do material são no regime linear o módulo de elasticidade inicial E , o qual se limita no gráfico de dispersão ao início de escoamento do material, definido pela tensão de escoamento σ_y e o módulo da fase plástica E_{Tp} , correspondente a fase do comportamento plástico do material, onde o módulo da fase plástica E_{Tp} não pode ser menor que zero ou maior que o módulo elástico Inicial E .

A fase plástica do material é determinada pela deformação plástica e pelo módulo da fase plástica E_{Tp} , quando $E_{Tp} = 99,9 \% E$, o modelo bilinear simula uma análise linear elástica, caso módulo da fase plástica $E_{Tp} = 1 \% E$ e/ou módulo da fase plástica $E_{Tp} = 0$, o modelo bilinear simula o comportamento de um material perfeitamente plástico.

Portanto nesta pesquisa será estudada o comportamento plástico considerando os módulos da fase plástica intermediários, em que $1\%E \leq E_{TP} \leq 99,9\%E$.

A Figura 3.16 representa graficamente a curva tensão vs deformação e os respectivos módulos de elasticidade para cada etapa de carregamento

Figura 3.16 – Módulos de elasticidade inicial e da fase plástica



Fonte: ANSYS Mechanical APDL Material Reference (2013).

4 MODELAGEM NUMÉRICA

O método dos elementos finitos (MEF) é um dos métodos numéricos mais utilizados para modelar o comportamento estrutural da alvenaria. Devido a sua flexibilidade em representar qualquer geometria, carregamentos e condição de contorno. Além de uma implementação computacional relativamente fácil (MATA, 2011).

Por intermédio de técnicas numéricas, é possível determinar o comportamento estrutural de componentes com formas complexas. Para isto é preciso o conhecimento das propriedades dos componentes, como espessura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade de massa, e as condições de contorno da estrutura conseguindo assim determinar as regiões mais

solicitadas do componente, estabelecendo-se previsões a respeito de seu comportamento (AVELINO, 2013).

Conforme Pedreiro (2011), o MEF, método dos elementos finitos, é baseado na discretização, onde o sistema é dividido em pequenas regiões denominadas elementos finitos, os quais são conectados entre si através de “Nós” formando o conjunto estrutural, o qual pode ser modelado numericamente.

A análise da alvenaria estrutural é trabalhosa e dispendiosa, por se tratar de uma estrutura complexa. Para que se possa avaliar todo o comportamento estrutural da alvenaria com o mínimo de erro e tempo é possível, hoje, utilizar o método dos elementos finitos (MEF), é uma ótima possibilidade.

O uso de análises numéricas, desde que sejam confiáveis, pode incorrer em redução da utilização de instrumentação da edificação e também a redução do número de corpos de provas, eliminando custos de ensaios experimentais (PELETEIRO, 2002).

A solução exata para uma análise física é obtida através da resolução de equacionamento empregando modelagem analítica, porém em condições que envolvam geometrias complexas, a modelagem contínua se torna inviável para a simulação estrutural, tornando o MEF uma melhor opção para análises estruturais (GARCIA JUNIOR, 2019).

Utilizando os meios computacionais, é possível resolver as equações algébricas que regem a teoria da resistência dos materiais para cada elemento, definidas a partir de suas respectivas condições de equilíbrio. Quando se utiliza os conceitos de MEF, a forma convencional de armazenar as informações no computador, é por meio de matrizes. Esse tipo de notação proporciona um melhor gerenciamento das equações para cada elemento em estudo (GARCIA JÚNIOR, 2019).

4.1 Modelagem da alvenaria

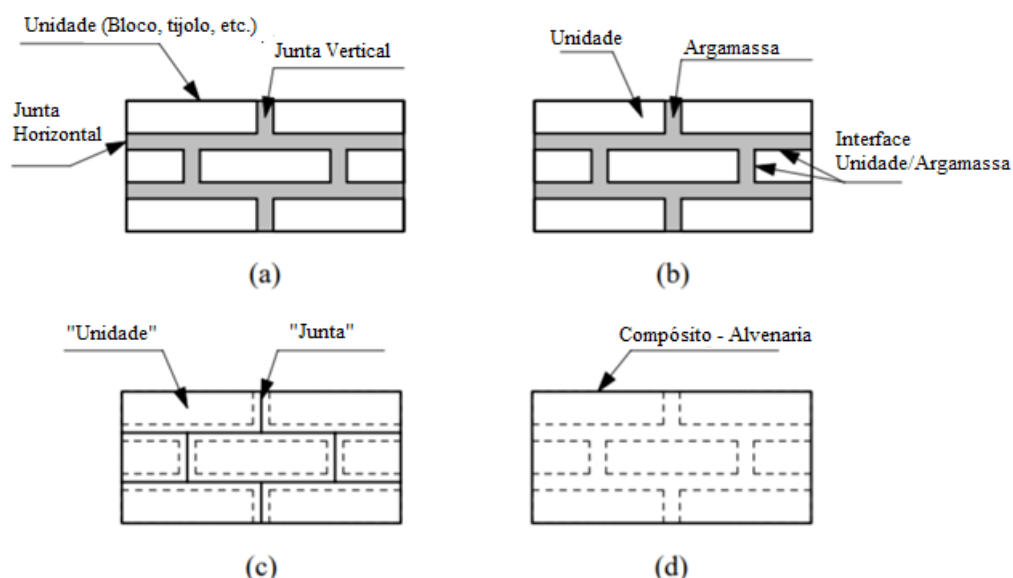
Do uso do sistema computacional, é preciso elaborar modelos discretos adotando hipóteses simplificadas dos sistemas equivalentes (ALVES FILHO, 2013). A identificação das variáveis relevantes como as condições de contorno (restrições, tipos de carga, etc.) constitui a base para o desenvolvimento de um projeto

adequado que possa reproduzir o comportamento do sistema analisado de forma idealizada e aproximada.

Conforme descrito por Lourenço (1996), as unidades e a argamassa na modelagem numérica podem ser consideradas de diferentes formas. Existem diferentes maneiras de se considerar as propriedades dos materiais na alvenaria. Para realização de análise numérica da alvenaria estrutural deve-se fazer a utilização de dois modelos aproximados: a micro modelagem e a macro modelagem.

A micro modelagem consiste em discretizar os componentes individualmente, separando-se a unidade e argamassa. A macro modelagem consiste em considerar a alvenaria como um compósito (PELETEIRO, 2002). Dependendo da complexidade da análise pode-se definir modelos de modelagem como segue na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Técnicas de modelagem para alvenaria: (a) Exemplar de alvenaria; (b) Micro modelagem detalhada; (c) Micro modelagem simplificada; (d) Macro modelagem



Fonte: Modificada de Lourenço (1996)

No modelo de micro modelagem detalhada (b) as unidades e argamassa são definidas como elementos contínuos, ou seja, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e as propriedades não-lineares são consideradas na modelagem. E a interface entre eles são definidos com descontinuos, sendo, portanto, representada como um plano potencial de fissuração/deslizamento com rigidez inicial pequena para evitar interpenetração no meio contínuo.

No modelo de micro modelagem simplificada, as unidades são consideradas elementos contínuos com dimensões expandidas, para manter a geometria da alvenaria inalterada. Já a argamassa e interface são consideradas descontínuas, portanto, as unidades nesse tipo de modelagem são consideradas com propriedades elásticas unidas por uma linha de fratura/deslizamento na interface. Esse tipo de modelagem não considera o coeficiente de Poisson, perdendo sua precisão na análise.

A micro modelagem possibilita uma análise mais minuciosa e proporciona o entendimento do comportamento local da estrutura, como exemplo o estudo sobre a distribuição e concentração de tensão na estrutura.

Para a macro modelagem (d) todos os materiais têm propriedades homogêneas, sendo as unidades, a argamassa e interface definidas como dispersas num meio contínuo, ou seja, trata a alvenaria como um meio homogêneo sem diferença entre unidades e argamassa. Esse tipo de modelagem é mais adequado para uma análise mais geral, principalmente em grades estruturas sólidas que garantem uma boa distribuição de esforços. A definição de qual modelagem é a melhor opção vai depender de qual objetivo a ser alcançado (PELETEIRO, 2002).

Uma estratégia de modelagem não pode ser preferida sobre a outra porque existem diferentes campos de aplicação para micro e macro modelos para alvenaria. Para o estudo em questão a micro modelagem é a mais indicada, pois conforme Lourenço, (1996), a micro modelagem é utilizada quando da necessidade de se conseguir um melhor entendimento sobre o comportamento local das estruturas de alvenaria.

4.2 Hipóteses adotadas na modelagem numérica

Os procedimentos de modelagens para as análises numéricas foram realizados de forma que fosse possível obter resultados confiáveis com valores e condições para serem comparados com os resultados experimentais, apresentado assim uma convergência satisfatória das curvas de tensão vs deformação para os prismas ensaiados experimentalmente e numericamente.

Os prismas analisados na pesquisa foram criados utilizando a classe de elementos sólidos tridimensionais. Para aplicação do Método dos Elementos Finitos considerou, na análise, problemas de elasticidade tridimensional, considerando o

material como elástico linear, a linearidade física e geométrica, e que os deslocamentos e as deformações foram infinitesimais.

A modelagem utilizada para a alvenaria foi a de micro modelagem detalhada onde as unidades e argamassa foram definidas como elementos contínuos, ou seja, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson destes materiais foram considerados. Para simular o comportamento não linear dos materiais, utilizado nas simulações da segunda parte desta pesquisa, foi considerado a plasticidade dos materiais.

Para as condições de contorno das interfaces entre blocos e argamassa foram definidas o comportamento linear, ou seja, foram consideradas interfaces com contatos, estando ligadas, porém sem penetração e deslizamento entre essas superfícies de contato. E a restrição do prisma foi definida como fixa na base, sem deslizamento do bloco em nenhuma direção e livre de movimentação na extremidade superior do mesmo.

4.3 Propriedades dos materiais na análise numérica

No presente trabalho as propriedades como resistência à compressão e tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram relacionados às unidades e argamassa com valores referentes aos próprios materiais ensaiados experimentalmente ou baseados em teorias já aceitas pelo meio acadêmico.

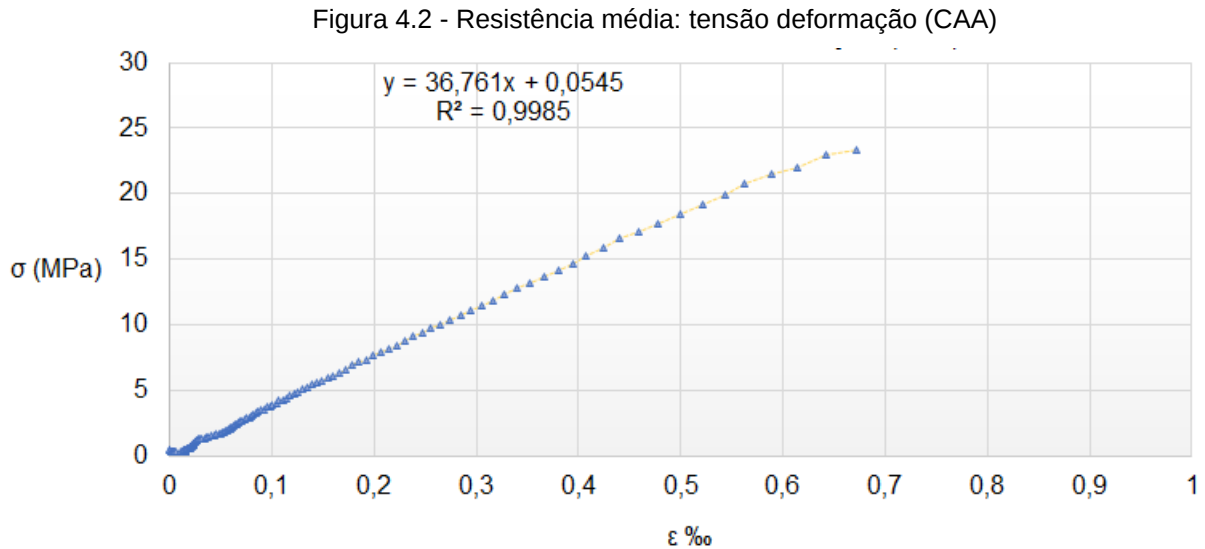
4.3.1 Propriedades do Concreto – comportamento elástico linear

A calibração da dosagem do concreto autoadensável foi realizada por Bortoletto (2020) através ensaios experimentais em CPs de 100 x 200 mm. As propriedades dos materiais como os valores da resistência à compressão última (f_{cu}), resistência tração última (f_{ct}) e Módulo de Elasticidade do concreto foram obtidas a partir dos ensaios experimentais baseados nos ensaios de resistência à compressão do concreto, conforme norma NBR 6118/2018.

Para a modelagem numérica a resistência à compressão do concreto foi considerada a própria tensão última para ruptura média dos CPs ensaiados por Bortoletto (2020) e o valor da tensão de escoamento foi a mesma que a tensão última, visto que o concreto teve comportamento frágil, sem grandes deformações,

até o momento da ruptura, os resultados experimentais mostraram um comportamento linear para a curva tensão vs deformação.

A Figura 4.2 mostra o gráfico da relação média de tensão deformação até o limite de ruptura do CAA, a partir dos ensaios realizados por Bortoletto (2020).



Fonte: Modificada de Bortoletto (2020)

Por falta de ensaios, a resistência à tração para o concreto nesta pesquisa foi definida conforme NBR 6118 (ABNT, 2014), de acordo com a Equação 4.1.

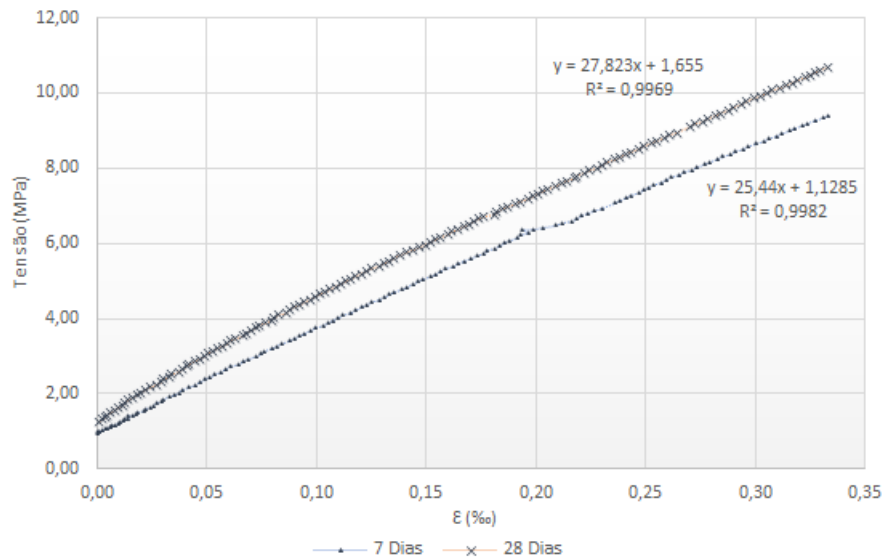
$$f_{ct} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (4.1)$$

O módulo de elasticidade do concreto foi obtido a partir da equação que melhor se ajustou as curvas que representam a relação entre a tensão e a deformação sofrida pelo concreto nos ensaios de compressão simples.

Nos ensaios experimentais para determinação do módulo de elasticidade estático, a medida de deformação do CAA foi realizada aproximadamente até 70% da carga de ruptura, visando a integridade do instrumento medidor de deslocamento. (BORTOLETTO, 2020).

A partir dos ensaios realizados por Bortoletto (2020), obteve-se a Figura 4.3, que mostra o gráfico para a relação média de tensão deformação até o limite de 70% da carga de ruptura do CAA, o qual foi utilizado para obter o módulo de elasticidade estático do CAA para as idades de 7 e 28 dias.

Figura 4.3 – Gráfico tensão deformação do CAA



Fonte: Modificado de Bortoletto (2020)

Para o Coeficiente de Poisson foi adotado o valor de 0.2.

A tabela 4.1 mostra as propriedades do concreto utilizadas na modelagem numérica.

Tabela 4.1 – Propriedades do concreto utilizado nos CP_s

Concreto Autoadensável					
f_{cu} (MPa)	f_{ct} (MPa)	f_{yc} (MPa)	f_{yt} (MPa)	E (MPa)	ν
23,31	2,448	23,31	2,448	27820	0,2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3.2 Propriedades do concreto – comportamento plástico

Após as análises do comportamento dos prismas no regime linear, onde se considerou a tensão solicitante com 80% da carga de ruptura dos materiais, foram feitas análises considerando o comportamento plástico dos materiais.

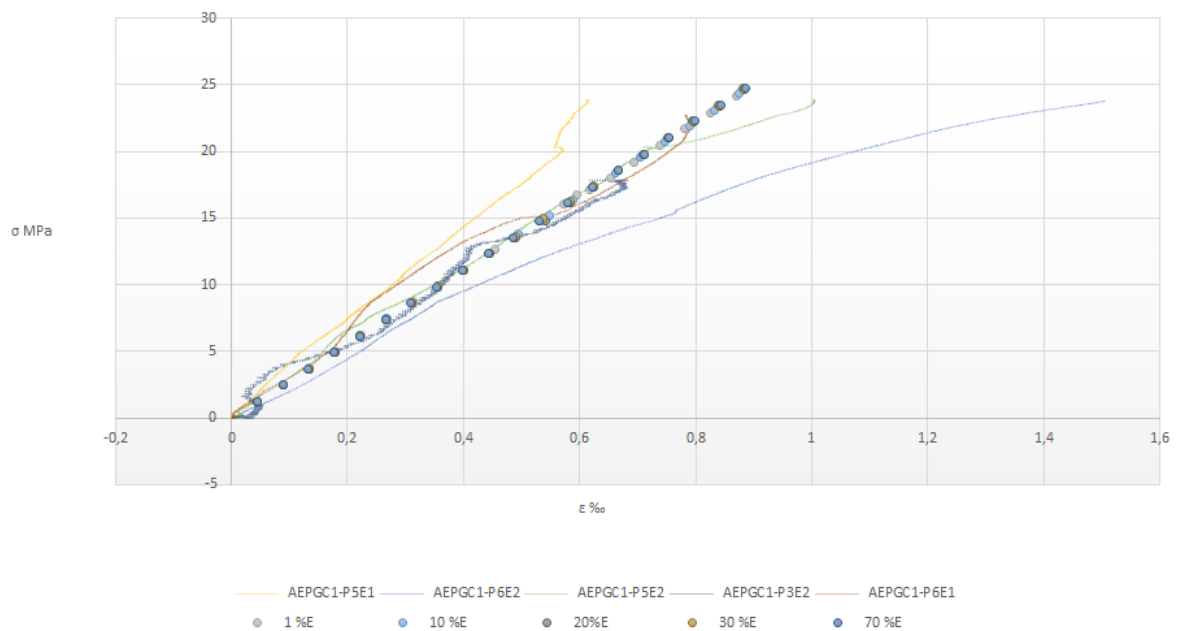
A plasticidade dos materiais foi inserida, na modelagem numérica, através da inserção do módulo da fase plástica E_{Tp} nas propriedades dos materiais. O módulo da fase plástica foi fixado através do modelo constitutivo Endurecimento Isotrópico Bilinear.

Devido a não complexidade do ensaio e das geometrias dos blocos utilizados nos prismas o modelo constitutivo de Endurecimento Isotrópico Bilinear foi admitido como suficiente para prever o comportamento dos materiais constituintes nos prismas ensaiados nesta pesquisa.

Com objetivo de encontrar um melhor valor para o módulo da fase plástica, para prever as propriedades plásticas dos materiais, foram feitas simulações no prisma PGC I com 5 módulos da fase plástica E_{Tp} diferentes e comparados com os ensaios experimentais realizados por Bortoletto, com os valores do módulo da fase plástica igual a $E_{Tp} = 1\%E$; $E_{Tp} = 10\%E$; $E_{Tp} = 20\%E$; $E_{Tp} = 30\%E$; $E_{Tp} = 70\%E$ sendo “E” o módulo inicial elástico do concreto.

A Figura 4.4 apresenta as soluções das tensões e deformações relativas aos valores do módulo da fase plástica igual a $E_{Tp} = 1\%E$; $E_{Tp} = 10\%E$; $E_{Tp} = 20\%E$; $E_{Tp} = 30\%E$; $E_{Tp} = 70\%E$.

Figura 4.4 - Convergência dos Módulos da fase plástica



Buscando um concreto que após o início da fase plástica o se apresentasse com um comportamento frágil optou-se por um módulo da fase plástica com valor de $E_{Tp} = 70\%E$ com E sendo o módulo inicial elástico do concreto.

A Tabela 4.2 apresenta os valores do módulo inicial elástico, o módulo da fase plástica e a tensão de escoamento do concreto.

Tabela 4.2 – módulo inicial elástico, o módulo da fase plástica e a tensão de escoamento do concreto

Plasticidade do Concreto MPa - Modelo Bilinear (%)		
Fase Elástica (E)	Tensão de escoamento MPa	Fase Plástica (E _T)
	Concreto	
27820	7,0	70%E = 19474

Fonte: Próprio autor

4.3.3 Propriedades da argamassa – comportamento elástico linear

Para os valores de resistência à compressão da argamassa foram utilizados os resultados dos ensaios experimentais de Bortoletto (2020). Por falta de ensaios, o valor da resistência à tração foi definido como 10% da resistência à compressão da argamassa. As resistências últimas f_{au} e de escoamento f_{ya} da argamassa foram definidas como iguais, assim como as do concreto considerando uma ruptura frágil do material.

O módulo de elasticidade da argamassa foi definido a partir dos trabalhos realizados por Khalaf e Fairbain (1992, citado por Mohamad 1998). As proporções de dosagem da argamassa foram estabelecidas conforme especificações Britânica BS-5628.

O valor do coeficiente de Poisson da argamassa utilizada nos prismas de alvenaria tem relação com as proporções de sua dosagem e também com o estado de confinamento da mesma quando ensaiada à compressão.

Para esta pesquisa o valor adotado do coeficiente de Poisson foi definido tendo como parâmetro o trabalho de Mohamad (1998), onde o valor adotado foi o valor em que as proporções de dosagem da argamassa eram equivalentes entre aos trabalhos de Bortoletto (2020) e Khalaf e Fairbain (1992) e foi selecionado o valor para condição de tensão nula para as tensões laterais.

A relação utilizada entre do módulo de elasticidade com a resistência à compressão da argamassa é apresentado na Equação 4.2.

$$E_{at} = 600 \cdot f_{arg} \quad (4.2)$$

A Tabela 4.3 mostra as propriedades da argamassa adotadas na modelagem numérica.

Tabela 4.3 – Propriedades da argamassa – Comportamento elástico

ARGAMASSA					
f_{cu} (MPa)	f_{ct} (MPa)	f_{yc} (MPa)	f_{yt} (MPa)	E (MPa)	ν
11,76	1,176	11,76	1,176	7056	0,14

Fonte: Elaboração do próprio autor

4.3.4 Propriedades da argamassa - comportamento plástico

O valor para o módulo da fase plástica da argamassa foi fixado em 70% do módulo elástico obtida na primeira etapa a simulação. A tensão de escoamento foi adotada conforme curva tensão deformação de Mohamed (1998), considerando os ensaios das argamassas construídas com o mesmo traço de argamassa 1:0.5:4.5.

A Tabela 4.4 mostra o módulo inicial elástico, o módulo inicial elástico, módulo da fase plástica e tensão de escoamento da argamassa.

Tabela 4.4 – Módulo inicial elástico, módulo da fase plástica e tensão de escoamento da argamassa.

Plasticidade da Argamassa MPa - Modelo Bilinear (%)		
Fase Elástica (E) MPa	Tensão de escoamento	Limite Plástico (E _T)
	MPa	
	Argamassa	
7056	0,59	70%E = 4940

Fonte: Próprio autor

4.4 Validação dos resultados – Curvas de tensão vs deformação

A validação das análises numéricas, dos prismas de blocos de concreto, foi determinada através da comparação entre as soluções obtidas numericamente e os ensaios experimentais realizados por de Bortoletto (2020), para as curvas de tensão vs deformação.

Os dados comparados foram relativos aos que foram obtidos, experimentalmente, utilizando extensômetros na instrumentação dos prismas,

obtendo assim soluções para as relações de tensão deformação na direção paralela ao posicionamento dos extensômetros nos prismas ensaiados.

Portanto as modelagens numéricas para alcançar as curvas de tensão vs deformação dos prismas foram obtidas em pontos específicos dos blocos, conforme coordenadas geométricas em que se localizaram os extensômetro nas análises experimentais.

A comparação entre as curvas tensão vs deformação dos resultados experimentais com as soluções numéricas, obtidas através do MEF, foram feitas dentro do regime linear-elástico dos materiais na primeira parte do trabalho e na segunda parte foi analisado o comportamento dos prismas considerando a plasticidade dos concretos e argamassa.

Outros autores também validaram seus resultados com comparações de acordo com resultados experimentais. Como exemplo pode-se citar Albertini (2009) e Santos *et al.* (2017).

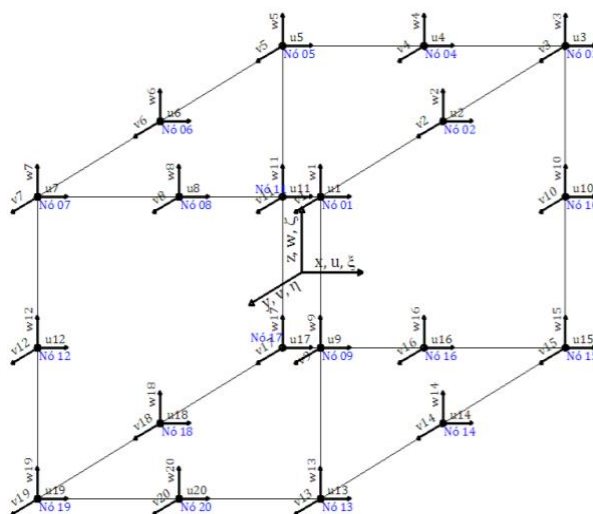
Albertini (2009), realizou uma pesquisa tendo como objetivo principal a simulação numérica do comportamento não linear físico de prismas, vazios e cheios com graute, de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais.

A discretização estrutural foi feita por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando elementos prismáticos regulares parabólicos com vinte nós, simulando as partes do bloco de concreto (14 cm x 19 cm x 29 cm).

Foi feita a modulação tridimensional dos prismas, bem como a introdução separada do módulo de elasticidade do concreto, do graute e da argamassa. As características físicas dos materiais foram feitas considerando suas propriedades individuais na modelagem numérica.

Para simular o concreto, o graute e a argamassa, considerando o prisma como uma série de elementos sólidos, foi adotado, o elemento finito prismático regular parabólico com vinte nós, conforme mostrado na Figura 4.5. Cada nó desse elemento possui três graus de liberdade, ou seja, deslocamentos nas direções x, y e z.

Figura 4.5 - Elemento finito prismático regular parabólico com vinte nós



Fonte: Adaptado de Albertini (2009)

Após a discretização dos prismas, a análise numérica foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o elemento prismático regular parabólico e implementado em programa computacional desenvolvido em Visual Basic, sendo as análises realizadas considerando a não linearidade física dos materiais e limite de ruptura dos prismas.

Primeiramente Albertini (2009), realizou ensaios com carregamento axial direto nos prismas, os quais foram ensaiados até a ruptura e assim obteve a carga limite de segurança para retirada dos aparelhos de aferição de medidas, e também obteve as resistências de ruptura para cada tipo de prisma ensaiado.

Após a definição do limite de segurança para a retirada dos aparelhos de aferição de medidas, os ensaios dos prismas na referida pesquisa foram realizados utilizando seis unidades de prismas denominadas PR2-A01, seis unidades de prismas PR2-A02 e seis unidades de prismas PR2-A02-G1, com A01 se referindo a argamassa menos resistente com 2,87 MPa, com A02 se referindo a argamassa mais resistente com 6,12 MPa e A02-G1 que se referindo aos prismas grauteados fabricados com a argamassa A02.

Os ensaios experimentais foram realizados com 18 prismas e o número de ensaios realizados estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Ensaio realizado com os prismas por Albertini (2009).

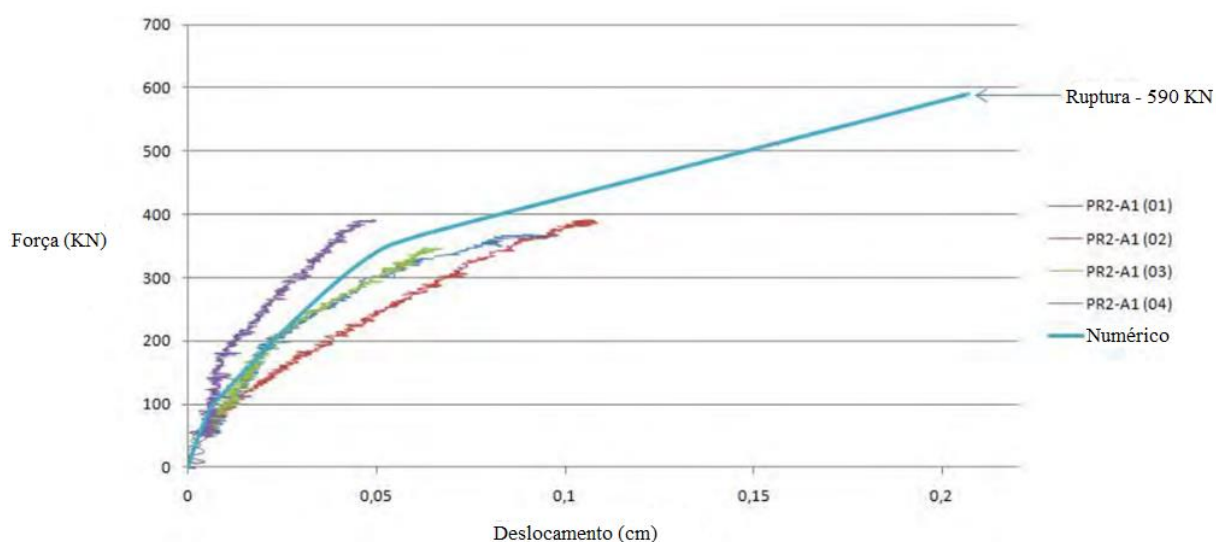
Tipo de Ensaio	Corpo-de-prova	Nº Amostras	Resistência	Deformações
Compressão	PR2-A1	2	Sim	Não
Compressão	PR2-A1	4	Sim	Sim
Compressão	PR2-A2	2	Sim	Não
Compressão	PR2-A2	4	Sim	Sim
Compressão	PR2-A2-G1	2	Sim	Não
Compressão	PR2-A2-G1	4	Sim	Sim

Fonte: Adaptada de Albertini (2009)

A Figura 4.6 apresenta a comparação para as análises experimentais e numéricas da curva tensão vs deformação para os prismas PR2-A01.

É importante enfatizar que no gráfico apresentado na Figura 4.6, a disposição dos dados de dispersão, obtida experimentalmente por Albertini (2009), foi limitada pela retirada dos equipamentos de aferição com uma carga segura, antes da ruptura do prisma. Já para a solução numérica a curva tensão vs deformação foi obtida considerando a simulação até ruptura do prisma, em que a ruptura ocorreu como incremento de carga de 590 KN e um deslocamento de 0,20678.

Figura 4.6 – Gráfico Força x Deslocamento: Comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A01

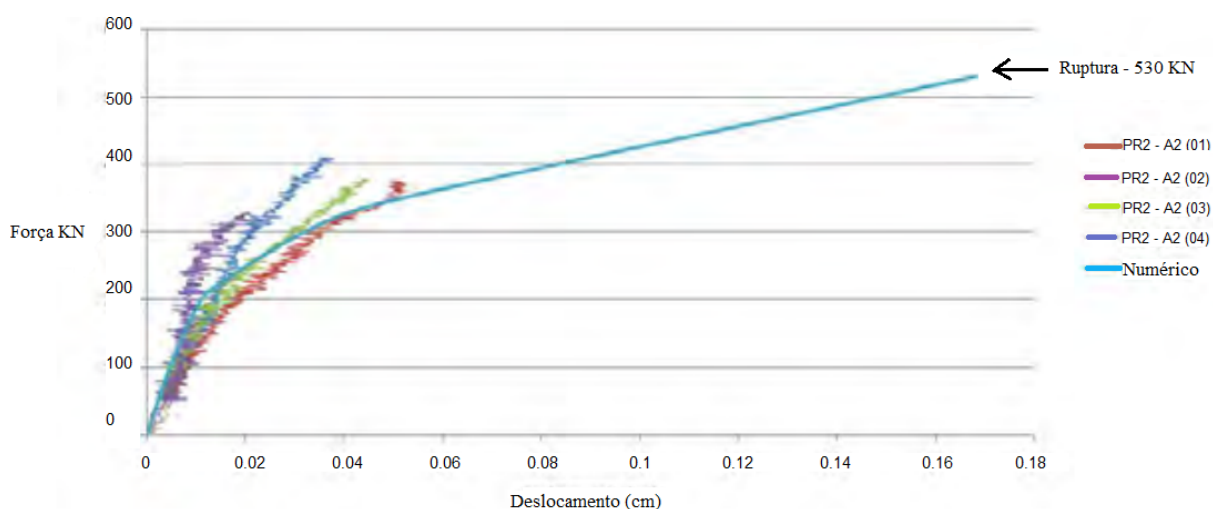


Fonte: Adaptada de Albertini (2009).

A Figura 4.7 apresenta a comparação para as análises experimentais e numéricas da curva tensão vs deformação para os prismas PR2-A02.

É importante enfatizar que no gráfico apresentado na Figura 4.7, a disposição dos dados de dispersão, obtida experimentalmente por Albertini (2009), foi limitada pela retirada dos equipamentos de aferição com uma carga segura, antes da ruptura do prisma. Já para a solução numérica a curva tensão vs deformação foi obtida considerando a simulação até ruptura do prisma, em que a ruptura ocorreu como incremento de carga de 530 kN e um deslocamento de 0,16855.

Figura 4.7 - Gráfico Força x Deslocamento: Comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A02.



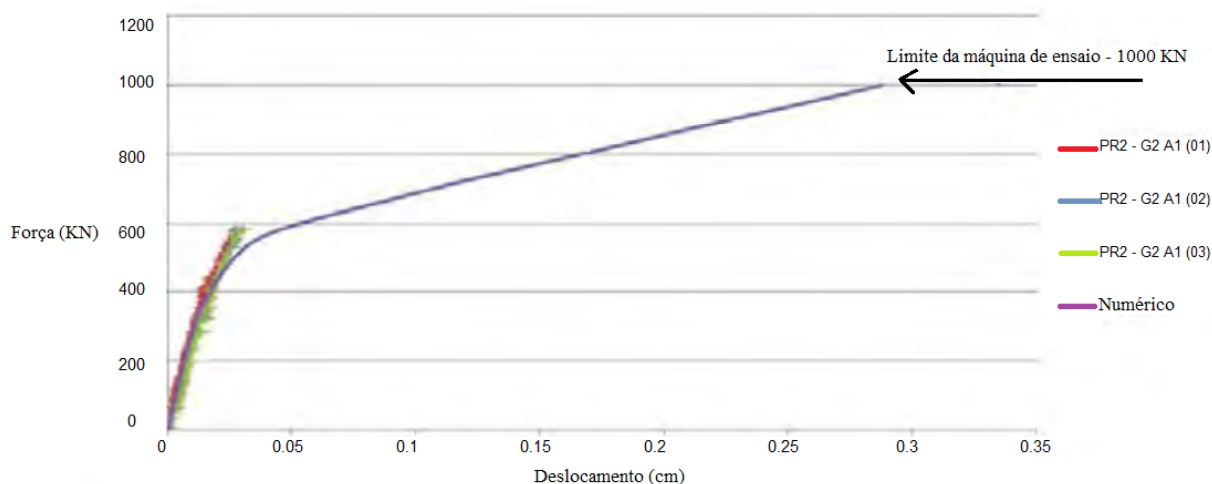
Fonte: Adaptada de Albertini (2009).

A Figura 4.8 apresenta a comparação para as análises experimentais e numéricas da curva tensão vs deformação para os prismas PR2-A02- G1.

É importante enfatizar que no gráfico apresentado na Figura 4.8, a disposição dos dados de dispersão, obtida experimentalmente por Albertini (2009), foi limitada pela retirada dos equipamentos de aferição com uma carga segura, antes da ruptura do prisma.

A análise numérica para o prisma PR2-A02- G1 foi realizada com a aplicação de carga conforme limite de carga da máquina utilizada nos ensaios experimentais, sendo este valor de 1000 kN, porém ao final da simulação não houve a ruptura de nenhum elemento de discretização do prisma.

Figura 4.8 - Gráfico Força x Deslocamento: Comparativo entre resultados experimentais e numéricos obtidos – PR2-A02-G1



Fonte: Adaptada de Albertini (2009)

A relação da força numérica de ruptura, para o prisma PR2-A01 experimentalmente foi obtida uma carga média de ruptura de 634,0 KN, enquanto numericamente a carga de ruptura foi de 590 KN, apresentado uma relação resultado experimental/resultado numérico de 7,45% aproximadamente.

Para o prisma PR2-A02 a carga média experimental foi de 519,4 KN, e numericamente esta teve magnitude de 530 KN, conseguindo uma relação de 2,07%.

Os resultados do prisma PR2-A02-G1 tanto a carga aplicada no ensaio quanto a carga limite adotada no programa foi atingida sem que houvesse ruptura de nenhum elemento, contudo a carga de fissuração foi determinada e esta ocorreu com a aplicação em média de 880 KN.

Em relação aos resultados apresentados anteriormente, para os prismas não grauteados, constata-se uma resistência maior do conjunto onde foi utilizada uma argamassa de menor resistência, no caso o prisma PR2-A01.

Santos, et al (2017), realizaram ensaios experimentais e análises numéricas, via Método de Elementos Finitos utilizando o software comercial ABAQUS, com o objetivo de apresentar uma calibração de modelos numéricos de prismas feitos com blocos de concreto comuns e com blocos de alta resistência. A comparação entre os resultados das análises dos autores, tanto numérica quanto experimental, fora comparada com os resultados experimentais obtidos por Oliveira (2014).

Com os resultados da modelagem numérica foram estudados os mecanismos responsáveis pela ruptura dos prismas, e eles foram comparados com comportamento observado durante os ensaios experimentais realizados pelos autores da referida pesquisa. Para a análise numérica, adotou-se a estratégia de micro modelagem detalhada, onde cada material (bloco e argamassa) foi representado por suas propriedades mecânicas. A validação dos modelos numéricos foi realizada com base em resultados experimentais realizados por Oliveira (2014) e Santos et al. (2017).

As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram as relações entre os resultados experimentais e numéricos da pesquisa.

Tabela 4.6 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos, PO (Prisma de Oliveira)

Comparação entre resultados experimentais de (Oliveira (2)) e numéricos obtido neste trabalho				
ID	Resistência à compressão dos prismas (f_p) MPa**	Módulo de Def. (GPa)**	Resistência à compressão dos prismas (f_p) MPa***	Módulo de Def. (GPa)***
PO – Exp.	5,16	8,17	9,42	14,92
PO – Num.	5,02	7,97	9,17	14,55
Diferença % ¹	- 3%	- 3%	- 3%	- 3%
** Resultados dados em relação à área bruta; *** Resultados dados em relação à área líquida; ¹ Em relação ao modelo experimental.				

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2017)

Tabela 4.7 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos, PA (Prismas dos Autores)

Comparação entre resultados experimentais e numéricos - Autores				
ID	Resistência à compressão dos prismas (f_p) MPa** ¹	Módulo de Def. (MPa)**	Resistência à compressão dos prismas (f_p) MPa***	Módulo de Def. (MPa)***
PA – Exp.	10,60	8006,40	18,47	13948,43
PA – Num.	10,11	7790,80	17,61	13572,82
Diferença % ¹	- 5%	- 3%	- 5%	- 3%
Resultados dados em relação à área bruta; *Resultados dados em relação à área líquida; ¹ Em relação ao resultado experimental.				

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2017)

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7 é possível concluir que os modelos numéricos foram capazes de reproduzir o comportamento mecânico de prismas compostos tanto por blocos de concreto comuns quanto de alta resistência.

Sendo a diferença entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos prismas obtidos numericamente e experimentalmente na ordem de 3% para o modelo PO e 5% para o modelo PA.

4.5 Concentração de tensão

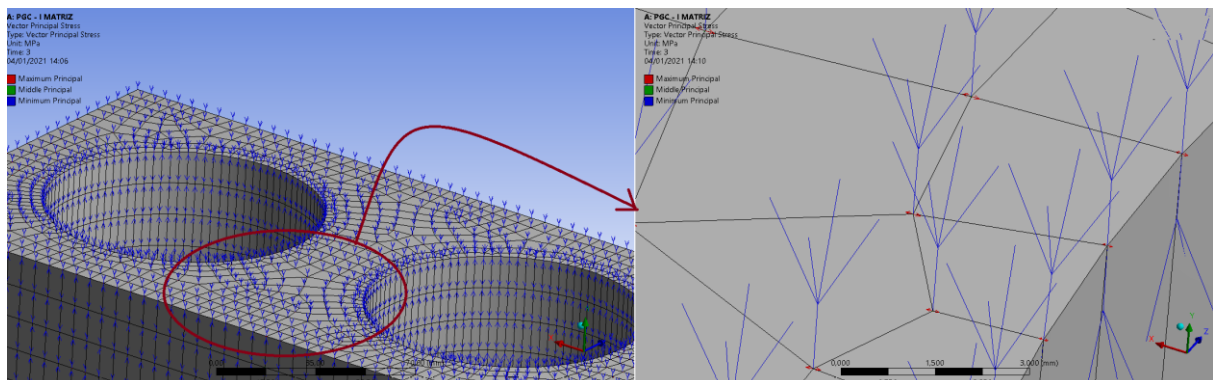
As concentrações das tensões foram analisadas considerando as tensões principais máximas e mínimas. As tensões principais máximas foram analisadas nas direções X e Y, já as Tensões principais mínimas foram analisadas somente na direção Y.

4.6 Vetores das tensões e deformações principais

A determinação das tensões e deformações de tração e compressão na análise numérica para esta pesquisa foram representadas através das tensões e deformações principais máximas e mínimas respectivamente.

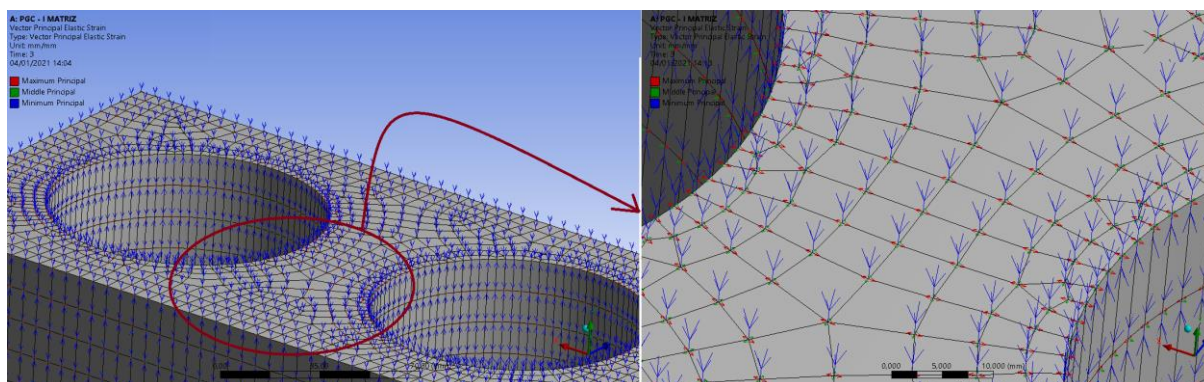
Os vetores das tensões e deformações principais no prisma, a partir das análises numéricas com o Ansys, são mostradas nas Figuras 4.9 e 4.10, onde estes vetores se posicionam de modo que as tensões e deformações máximas estão dispostas nos planos horizontais e as tensões e deformações mínimas nos planos verticais, conforme coordenadas do prisma.

Figura 4.9 – Vetores das tensões principais máxima, médias e mínimas



Fonte: Próprio autor

Figura 4.10 – Vetores das deformações principais máxima, médias e mínimas



Fonte: Próprio autor

4.7 Critério para início de fissuração - FS

Buscando simular a maior ou menor probabilidade do início de fissuração dos prismas foram feitas análises utilizando o critério para início de escoamento - FS nos prismas PGC I, PGC II, PGH I, PGH II, PGRI e PGR II.

A modelagem para o critério FS foi feita com base no critério de Rankini, sendo, portanto, os valores de FS uma relação entre as resistências à tração dos componentes do prisma com as tensões de tração geradas nos prismas.

Os valores de FS são gerados em todos os pontos dos prismas, sendo que se em um ponto qualquer do prisma os valores de FS se apresentarem menor que a unidade 1 isso significa que, naquela área, a tensão de tração gerada no prisma é maior que a resistência a tração do mesmo, sendo, portanto, naquele ponto iniciado o escoamento do material.

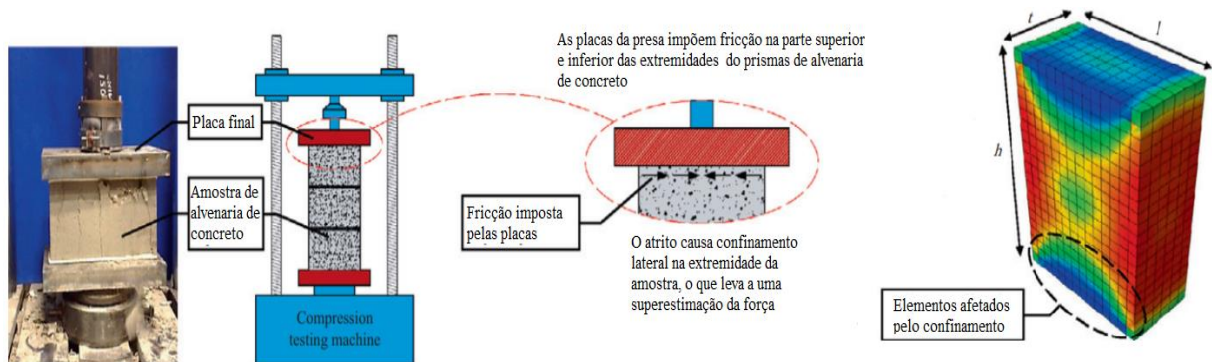
Para evitar as tensões de confinamento nos prismas analisados numericamente para o início de fissuração será definido uma modelagem numérica utilizando prismas de três blocos, e os resultados foram relativos somente ao bloco central do prisma.

O prisma de 3 blocos não é citado em normas brasileiras, mas seu uso é aconselhado principalmente por se evitar ter influência na resistência final do prisma devido ao efeito de confinamento que ocorre na interface prisma e prensa hidráulica.

Conforme Abasi et al. (2020), as placas da prensa de ensaios quando em contato com o prisma causa um confinamento de tensão nos extremos dos prismas e com isso induz a geração de uma tensão local superestimada.

A Figura 4.11 mostra a ilustração das concentrações das tensões próximos as placas das prensas.

Figura 4.11 – Amostra esquemática do confinamento de tensão no prisma



Fonte: Modificado de ABASI et al. (2020)

O critério para prever o início de fissuração foi a concentração de tensão de tração no bloco e as considerações para a utilização deste critério foram de que:

- A deformação do material concreto foi definida como frágil e a tensão de escoamento foi definida igual à tensão última.

- O carregamento foi definido como estático;

- A convenção para as tensões principais definidas como: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$;

Onde:

- σ_1 : Tensão máxima em magnitude: Tensão relativa de tração

- σ_2 : é a tensão média em magnitude: Tensão relativa à tensão de compressão e tração;

- σ_3 : Tensão mínima em magnitude: Tensão de compressão;

- σ_{yt} : Resistência ao escoamento do material à tração;

- σ_{yc} : Resistência ao escoamento do material à compressão; e

- Até o início da primeira fissura o comportamento mecânico do prisma foi considerado linear elástico.

Para obter o (FS), relativo ao início de fissuração, os prismas foram simulados segundo critério da máxima tensão de tração. O limite para fissuração foi determinado baseado nos valores das resistências ao escoamento dos materiais. Portanto $FS \geq 1,0$ significa que o prisma se encontra dentro do limite de segurança para o início da fissuração, se $FS \leq 1,0$ fissuração iniciada.

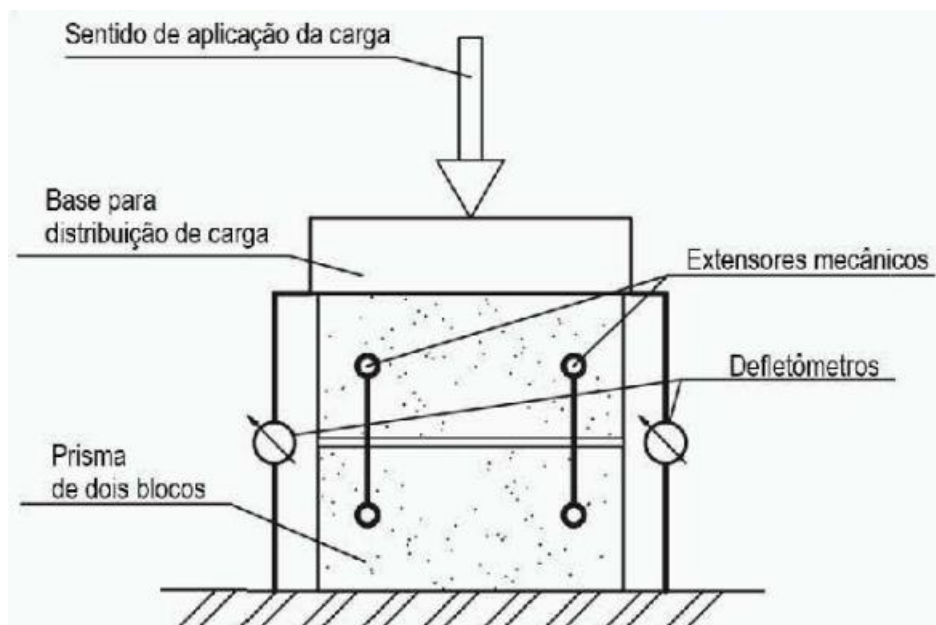
4.8 Instrumentação da alvenaria

Os extensômetros elétricos são instrumentos de medida que transformam pequenas variações dimensionais em variações equivalentes em sua resistência elétrica. Devido à sua precisão de medida, facilidade de manipulação e capacidade de verificar as deformações, é o instrumento de medida de deformação mais utilizado pelos profissionais da área (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

Os ensaios realizados experimentalmente por Bortoletto (2020) foram ensaios de compressão em prismas com diferentes geometrias, e estes foram instrumentados com os extensômetros e LVDTs. O diagrama para o ensaio de determinação da resistência do prisma (f_p) é mostrado na Figura 4.12.

A Figura 4.12 apresenta o esquema do ensaio experimental dos prismas à compressão segundo ABNT NBR 16868 - 3 (2020).

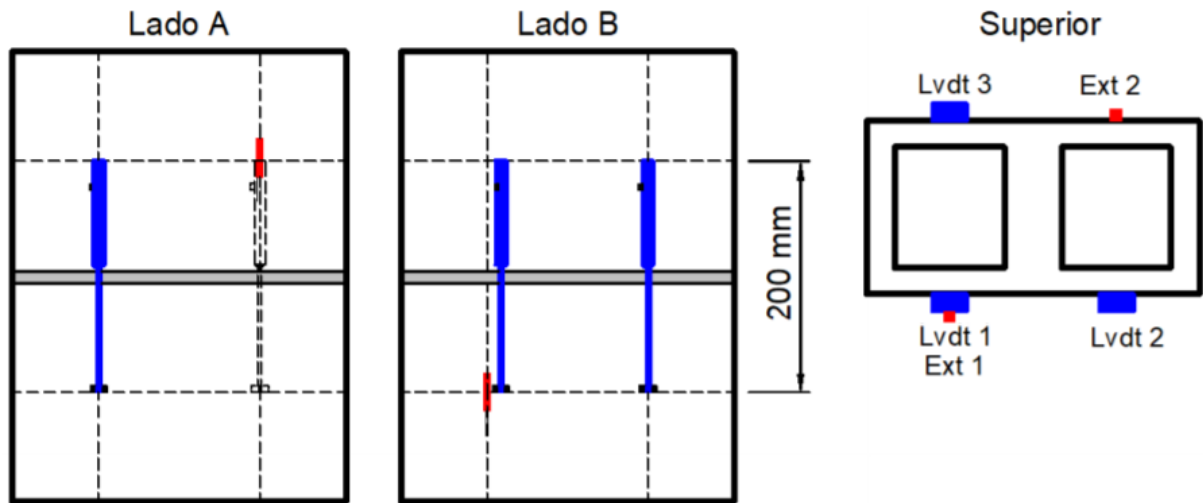
Figura 4.12 - Esquema para o ensaio de determinação da resistência do prisma (f_p) com a instrumentação para a determinação do módulo de deformação (E_p)



Fonte: ABNT NBR 16868 - 3 (ABNT, 2020).

A Figura 4.13 mostra como foi feita a instrumentação, feita por Bortoletto (2020) dos extensômetros e LVDTs experimentalmente.

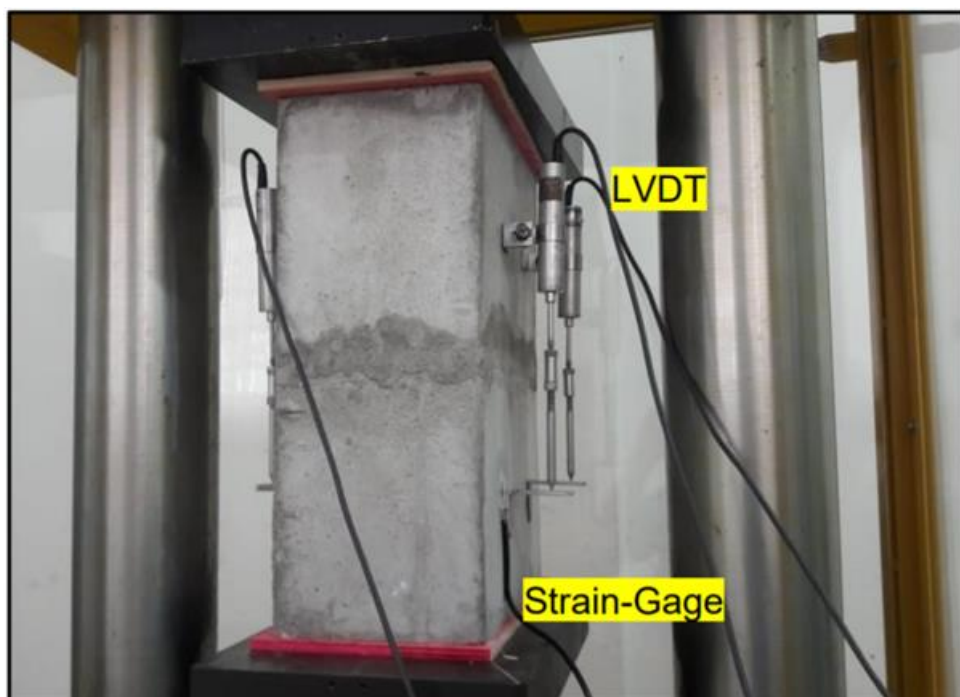
Figura 4.13 - Marcações e posicionamentos dos LVDTs e extensômetros (Strain Gages)



Fonte: Adaptado de Bortoletto (2020)

A Figura 4.14 mostra a imagem real da instrumentação realizada experimentalmente na pesquisa experimental.

Figura 4.14 - Prisma instrumentado por LVDTs e extensômetros (Strain-Gages)

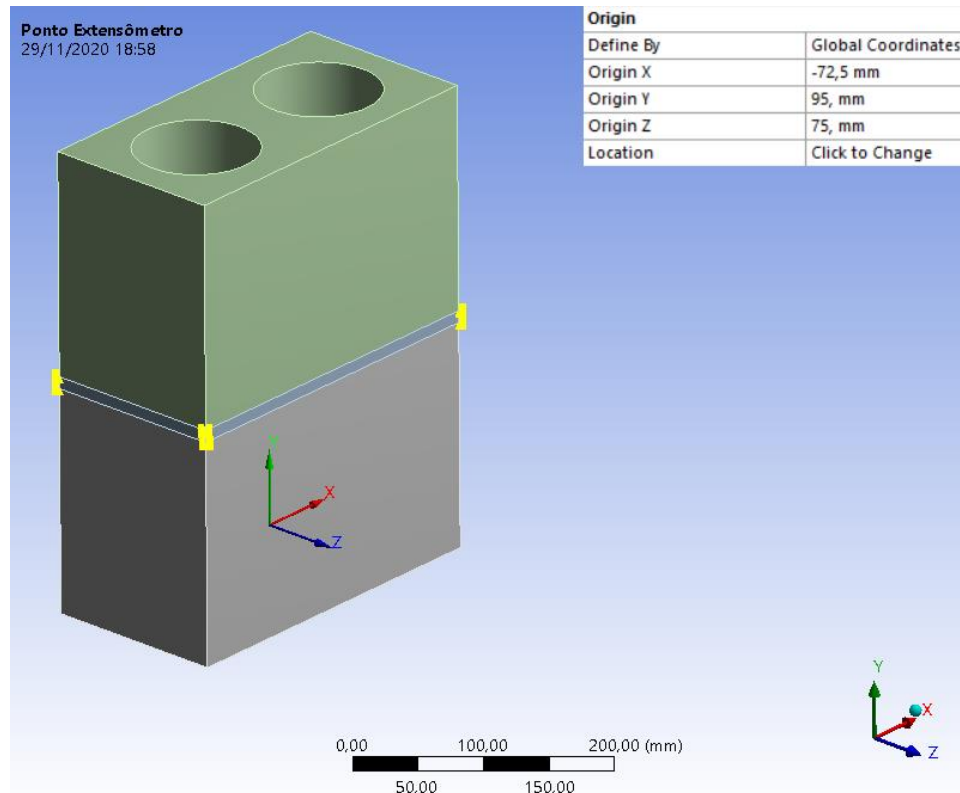


Fonte: Adaptado Bortoletto (2020)

As coordenadas geométricas para simular os locais dos extensômetros nos prismas, na análise numérica, foram definidas para $X = -72,5 \text{ mm}$; $Y = 95 \text{ mm}$ e $Z = 75 \text{ mm}$. Devido a simetria geométrica dos blocos, somente um ponto foi considerado nos prismas ensaiado numericamente.

A Figura 4.15 mostra o local que simula onde se localiza o extensômetro no prisma, o qual, é utilizado para obtenção da curva tensão vs deformação na análise numérica.

Figura 4.15 - Coordenadas x, y, z da região que simula o local do extensômetro

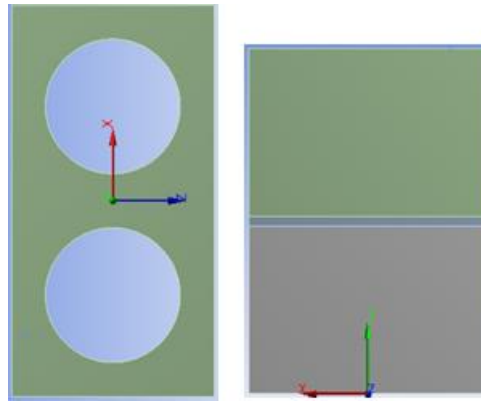


Fonte: Próprio autor

Para o ajuste das coordenadas do local que simula o extensômetro no prisma, o centro de referência definido como ponto central do prisma, é mostrado na Figura 4.16.

A Figura 4.16 mostra o centro de referência para $X = 0$ mm; $Y = 0$ mm e $Z = 0$ mm, sendo a figura da esquerda mostrando a visão da base do prisma e a figura da direita a visão lateral do bloco, com isto é possível ver o local em que o ponto de origem cartesiana se encontra no prisma, em que a partir desta coordenada de origem que é definido o ponto que simula o local do extensômetro.

Figura 4.16 – Coordenadas globais dos prismas



Fonte: Próprio Autor

Neste trabalho não foram consideradas as análises experimentais realizadas com os LVDTs, para comparação da relação tensão deslocamento.

4.9 Discretização dos componentes da alvenaria por elementos sólidos tridimensionais

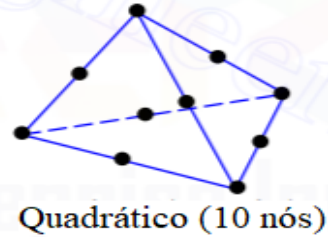
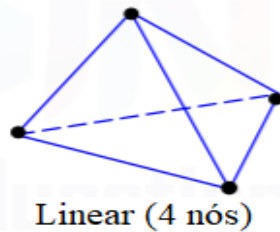
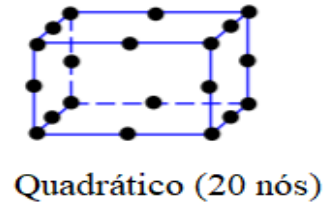
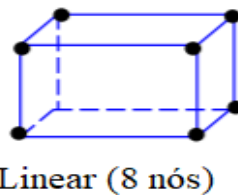
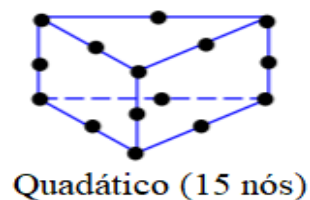
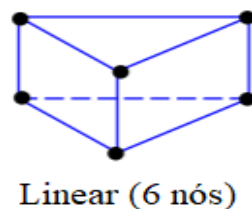
No software Ansys, a classificação dos elementos tridimensionais, utilizados na discretização dos elementos sólidos, é feita a partir da sua discretização, conforme sua forma e a sua ordem.

O elemento linear é o elemento de menor ordem e o elemento quadrático é o de maior ordem. Um elemento de ordem linear tem seus “Nós” somente nos extremos de suas arestas, enquanto que um elemento de ordem quadrática tem seus nós dispostos também na mediana de suas arestas, além de apresentar nós também nos extremos.

Independente da tipologia do elemento de malha utilizado, os resultados da simulação numérica devem apresentar resultados próximos, sendo necessário dependendo da geometria do objeto, um maior ou menor refinamento em locais específicos da geometria estudada.

A Figura 4.17 apresenta os elementos de malha dispostos para a discretização dos sólidos.

Figura 4.17 – Elementos de malha

Tetraedro**Hexaedro (Tijolo)****Pentahedron:**

Fonte: Adaptada e modificada de Chen e liu (2015)

O elemento Tetraedro é um elemento deficiente, menos preciso, quando comparado ao elemento hexaedro, isso se deve a quantidade de nós, onde é maior no hexaedro, porém o elemento tetraedro tem uma melhor adaptação para variações geométricas possíveis e requer um tempo computacional menor para processamento dos resultados.

O elemento tetraedro apresenta resultados constantes, portanto não representa valores satisfatórios quando for utilizado sem um bom refinamento de malha. Sendo assim para locais com maior concentração de tensões é necessário realizar um maior refinamento da malha para que se tenha uma melhor convergência dos resultados e compensação para sua deficiência.

Quando da utilização de elementos tetraedros de ordem linear o software Ansys recomenda a utilização de elementos de ordem maiores, evitando imprecisões dos resultados.

O elemento hexaedro tem uma maior precisão em seus resultados, pois o mesmo contém um maior número de nós e conseqüentemente um maior número de

variáveis em suas equações de interpolação, porém tem uma maior dificuldade em se adaptar às variações geométricas.

Ao discretizar um componente utilizando a interface Workbench no Ansys, a malha pode ser formada por um ou mais tipos de elementos diferentes, dependendo da complexidade geométrica do objeto.

Os métodos de subdivisão dos elementos finitos disponíveis no software Ansys e utilizados na presente pesquisa foram:

a) Malha Hexaedra Independente – Este método, é uma técnica de arranjo articulado independente, em que a malha é criada não considerando a forma da peça, ou seja, caso não seja possível uma malha somente com elementos hexaedros ele ajusta as configurações para que a malha hexaedra seja criada em regiões estruturadas e uma malha livre seja criada nas regiões não estruturadas.

Nesta pesquisa este método foi configurado com o mapeamento de malha definida por uma malha pura de hexaedros, porém os locais da geometria dos blocos onde uma malha pura de hexaedros não foi possível uma malha não estruturada de elementos tetraédricos e piramidais foram criados pelo próprio programa.

b) Malha Hexaedra Dependente – Malha criada preferencialmente com hexaedros. Seu arranjo é articulado dependente, portanto, a malha é criada seguindo as formas da peça. Quando possível a criação da malha será estruturada, sendo formada somente por elementos hexaedros, caso não, será criada uma malha não estruturada composta por outros elementos quadriláteros e triangulares.

c) Tetraedra – A técnica de arranjo para a criação da malha é dependente da geometria da peça e a malha criada é predominantemente tetraédrica, principalmente devido a sua facilidade de se adaptar a diferentes geometrias.

A adaptação dos elementos nos contornos geométricos do objeto a ser analisado pode ocorrer de forma que alguns destes elementos não apresentem o formato ideal e, certamente influenciam de forma negativa nos resultados.

No Ansys é possível verificar a qualidade desses elementos através de métricas de malha. As métricas de malha disponíveis são: qualidade dos elementos, relação de aspecto para triângulos ou quadriláteros, razão Jacobiana, fator de distorção, desvio paralelo, máximo ângulo do canto, assimetria, e qualidade ortogonal (AZEVEDO, 2015).

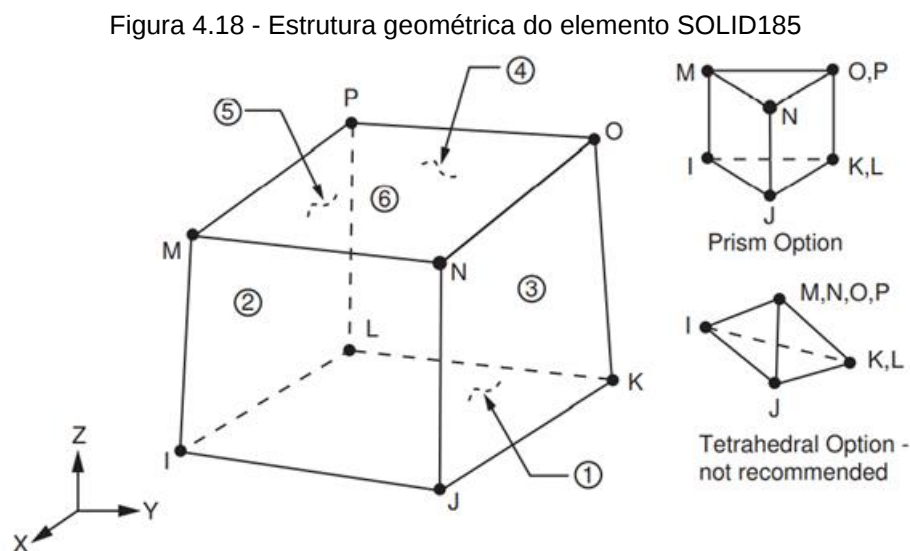
4.10 Modelagem dos componentes dos prismas

No presente estudo a discretização da malha a partir de elementos hexaedros e tetraedros criou elementos tridimensionais predominantes nos componentes dos prismas como blocos, argamassa e interfaces de contatos. Os elementos predominantes foram os SOLID185, SOLID187, TARGE170, CONTACT174 e SURF154.

O SOLID185 é usado em modelagem 3-D de estruturas sólidas hexaédrica linear. Este elemento é composto por 8 nós e três graus de liberdade para cada “Nó” e apresenta translação nas direções nodais x, y e z.

O elemento tem propriedades de plasticidade, hiper elasticidade, tensão de enrijecimento, fluência, capacidade de grandes deflexões e deformações. Também possui capacidade de formulação mista para simular deformações de materiais elastoplásticos quase incompressíveis e materiais hiper elásticos totalmente incompressíveis (ELEMENTS REFERENCE - ANSYS RELEASE 11.0, 2007).

A Figura 4.18 mostra a estrutura geométrica do elemento Solid185 utilizado na discretização de elementos tridimensionais.



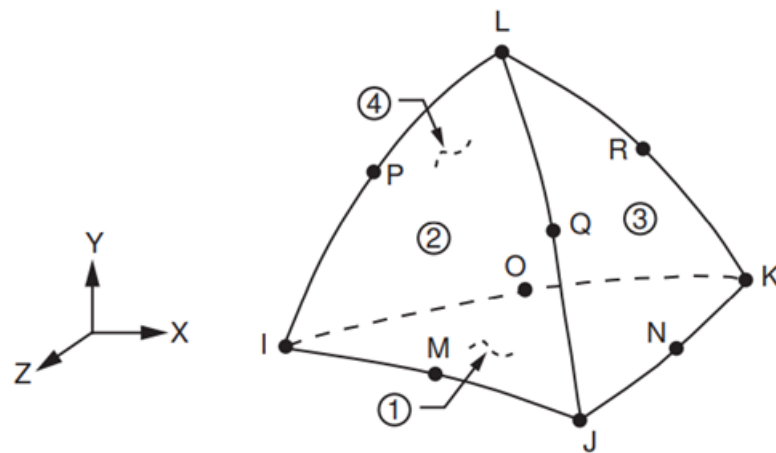
Fonte: Elements Reference - ANSYS Release 11.0.

O SOLID187 é um elemento de estrutura tetraédrica de ordem quadrática e é bem adequado para modelar elementos de geometrias irregulares. É definido por 10 nós com três graus de liberdades por nós: translações nas direções nodais x, y, z.

O elemento possui plasticidade, hiper elasticidade, fluência, tensão de enrijecimento, grandes capacidades de deflexão e deformações. Também possui capacidade de formulações mistas para simular deformações em materiais elastoplásticos quase incompressíveis, e materiais hiper elásticos totalmente incompressíveis (ELEMENTS REFERENCE - ANSYS RELEASE 11.0, 2007).

A Figura 4.19 mostra a estrutura geométrica do elemento Solid187 utilizado na discretização de elementos tridimensionais.

Figura 4.19 - Estrutura geométrica do elemento SOLID187

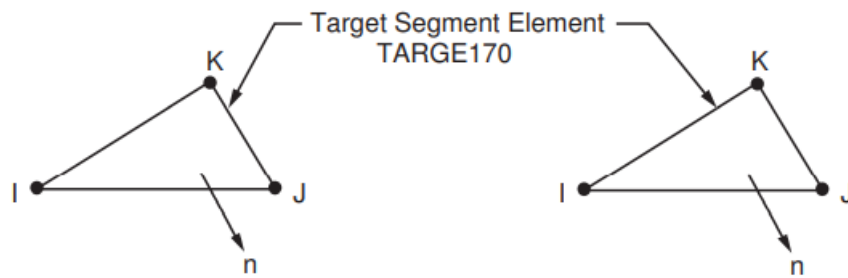


Fonte: Elements Reference - ANSYS Release 11.0.

O elemento TARGE170 é usado para representar várias superfícies de contatos alvos (destinos) associados em elementos sólidos 3-D para os elementos de contato associados. Os próprios elementos de contato se sobrepõem aos elementos sólidos, eles podem ser compostos por elementos de linha ou bordas de elementos de casca que descrevem o limite de um corpo deformável que está potencialmente em contato com a superfície alvo rígida, portanto, um "alvo" é simplesmente uma geometria singular no espaço que sente e responde quando um ou mais elementos de contato se movem para um segmento de destino elemento (ANSYS RELEASE 12.0, 2009).

A Figura 4.20 mostra a estrutura geométrica do elemento TARGE170 utilizado na discretização de superfícies de contato alvo em elementos tridimensionais.

Figura 4.20 – Elemento TARGE170

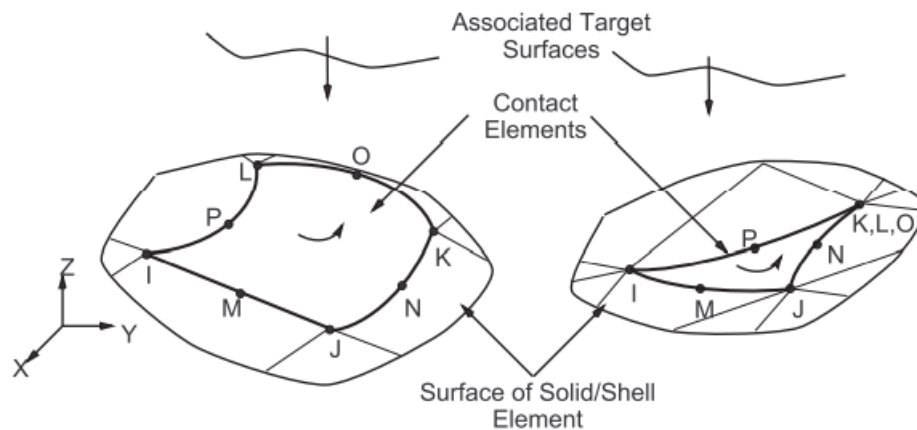


Fonte: Ansys Release 12.0 (2009)

O elemento de contato CONTA174 está associado aos elementos de segmento de destino 3-D TARGE170. Este elemento está localizado na superfície de elementos de casca sólidos 3-D (chamados de elemento subjacente). Possui as mesmas características geométricas dos elementos subjacentes. A superfície de contato pode ser um dos lados ou ambos os lados da casca ou elementos de viga.

A Figura 4.21 mostra a estrutura geométrica do elemento CONTA174 utilizado na discretização de superfícies de destino em elementos tridimensionais.

Figura 4.21 – Elemento CONTA174



Fonte: Ansys Release 12.0 (2009)

5 ANÁLISE NUMÉRICA

Todo processo das análises desta pesquisa fora realizado por um desktop com processador Intel Core (TM) i7, CPU de 2.60GHz memória RAM de 8 GB com sistema operacional de 64 bits.

As análises numéricas dos ensaios experimentais praticadas por Bortoletto (2020) foram feitas utilizando o software Ansys utilizando a interface Workbench em sua versão 2020 R2, com licença acadêmica. O método utilizado para realizar as análises numéricas foi o Método de Elementos Finitos (MEF).

O MEF apresenta como resultados valores normalmente próximos aos resultados experimentais, portanto para se obter resultados numéricos satisfatórios e confiáveis faz-se necessário a calibração dos modelos analisados. A calibração foi feita com diferentes tipos e tamanhos de malha.

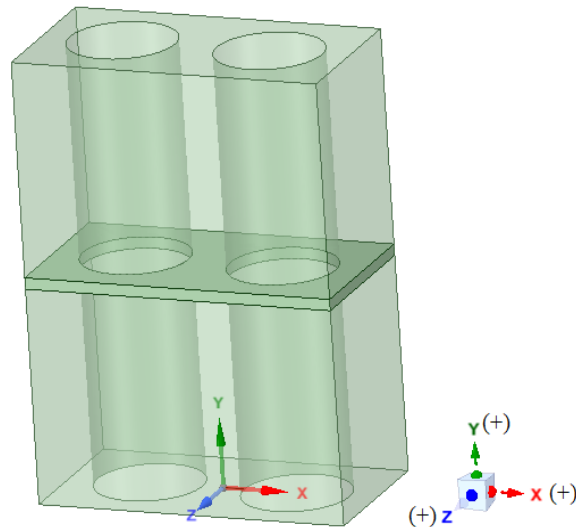
5.1 Geometria dos prismas

As geometrias para as análises numéricas foram criadas através da plataforma de modelagem 3D SpaceClaim, a qual está inserida dentro do próprio software Ansys, esse processo foi escolhido com o objetivo de obter uma maior eficiência, pois o software Ansys reconhece a geometria em análise evitando que ocorra algum erro relacionado as operações de CAD 3D importados externamente para o Ansys.

As medidas dos prismas foram feitas fielmente conforme realizadas experimentalmente, condicionando a adaptação da malha ao software conforme o tipo de malha escolhida. Para todas as geometrias criadas os eixos de referência ficaram definido sendo o “x” relativo ao eixo horizontal ao longo do comprimento do prisma, o “Y” como o eixo vertical ao longo da altura e o “Z” sendo o eixo horizontal ao longo da espessura do prisma conforme Figura 5.1.

A Figura 5.1 mostra as coordenadas global X, Y e Z. A partir destas coordenadas (0; 0; 0) as dimensões do prisma foram criadas.

Figura 5.1 – Eixos globais de referência para os prismas



Fonte: Próprio Autor

5.2 Propriedades mecânicas dos componentes

Os materiais criados para as análises numéricas foram o concreto e argamassa. Para criação do concreto e argamassa foi utilizado o material “concrete”, de comportamento linear, já pré-disposto na biblioteca do Ansys. Para alcançar as características físicas necessária destes materiais suas propriedades iniciais foram alteradas dentro da própria interface na biblioteca do Ansys, para valores conforme já descrito no Capítulo 4 para as Tabelas 4.0 a 4.3.

5.3 Discretização da malha

Para a escolha de qual elemento utilizar na discretização da malha dos componentes, na primeira parte da pesquisa, para obter as curvas tensão vs deformação dos prismas foram utilizados dois principais tipos de elementos tridimensionais: a malha tetraédrica e a hexaédrica.

Foram utilizados na discretização dos componentes dos prismas elementos tetraedros de ordem quadrática, não se utilizou a malha tetraédrica com ordem linear, pois o próprio Ansys diz que quando usado com ordem linear pode se obter resultados não confiáveis. Também foi utilizado tipologia de malha hexaedra, porém com ordem linear, pois esta tipologia de malha apresenta uma boa qualidade de malha mesmo sendo uma malha de baixa ordem.

Dentro da discretização numérica estudou-se a qualidade da malha através da métrica de qualidade do elemento, em que o parâmetro estudado é a forma dos elementos criados na discretização dos componentes, ou seja, quanto mais cúbico for os elementos de malha criado melhor será considerado a malha.

O software Ansys possibilita a visualização da quantidade de elementos como também sua concentração no volume geométrico do prisma, sendo um bom parâmetro para verificação da qualidade de malha para elementos tridimensionais.

A métrica “Element Quality” é a métrica que mede a qualidade da malha, ela é apresentada na Equação 5.0.

$$Quality = C \left(\frac{VOLUME}{\sqrt[2]{\sum (comprimento\ das\ arestas^2)^3}} \right) \quad (5.0)$$

A Tabela 5.1 mostra os valores de C para cada tipo de elemento.

Tabela 5.1 - Valores de C para cada tipo de elemento

Elemento	Valor de C
Triangular	692.820.323
Quadrangular	4
Tetraédrico	12.470.765.802
hexagonal	4.156.921.938
Cunha	6.235.382.905
Piramidal	36

Fonte: Adaptado Azevedo (2015)

As malhas globais foram definidas a partir de uma discretização automática através do método Mapped Meshing, com o comando denominado “mechanical”, em que seleciona a geometria do domínio de interesse, mapeia os pontos e gera automaticamente a malha, gerada pelo próprio software considerando um comportamento mecânico físico-linear de todos os componentes da alvenaria e a partir da geração desta malha global foi realizado as configurações locais de malha.

De modo geral para a calibração as configurações locais de malha dos componentes foram realizadas configurando a ordem do elemento (1), características de forma destes elementos (2), refinamento controlado (tamanho dos elementos utilizados) (3) e para a superfície de contato entre blocos e junta de

ligação o controle de malha local foi definido utilizando comandos de controle de tamanho dos elementos, buscando uma compatibilidade dos nós nas interfaces, como também foi utilizado o refinamento nas paredes e arestas dos vazados nas geometrias dos prismas (4).

Portanto, a calibração das configurações locais foi feita, mais detalhadamente, da seguinte forma:

1) A configuração da malha tetraédrica foi feita com elementos de ordem quadrática, o que é recomendado pelo software Ansys, para evitar valores de aproximação não satisfatórios. Para a malha hexaédrica a ordem foi definida como linear.

2) As configurações de forma dos elementos foram feitas com o comando “patch conforming”, o qual considera a geometria do objeto para a criação da malha e “patch Independent”, em que a malha é criada independente da forma na peça, onde toda a peça é envolvida por uma malha e depois são aparadas as sobras no contorno do objeto. A forma dos elementos utilizados na discretização dos componentes de alvenaria foram o “Hexaedro” e o “Tetraedro”.

3) O comando “Sizing” permite um refinamento controlado da malha, portanto este foi utilizado para uma discretização local das malhas Tetraédricas e Hexaédricas. Para calibração de qual tamanho de malha utilizar, como padrão na análise numérica linear dos prismas experimentais de dois blocos, as dimensões (global e local) das quatro configurações de malhas utilizadas neste trabalho são apresentadas na tabela 4. A escolha para o tamanho da malha inicial foi de 12 mm, as malhas com dimensões menores foram criadas para verificar possíveis melhores resultados. A calibração do experimento numérico foi realizada utilizando o prisma PGC 1.

4) As malhas de contato foram criadas utilizando o comando do Ansys denominada “Contact Sizing”, buscando a compatibilidade entre os “Nós” nas interfaces do bloco-argamassa. Para o controle da malha nas faces e arestas foram usados os comandos “Face Sizing” e “Edge Sizing respectivamente.

A Tabela 5.2 mostra as configurações dos tamanhos de malha para os componentes do prisma.

Tabela 5.2 – Calibração da configuração de refinamento da malha para análise numérica

Configuração de Malha				
Controle de Refinamento	Medida (mm)			
	1º *	2º **	3º ***	4º ***
Global	12	6	12	12
Local	12	6	12	12
Contato	12	6	12	6
Controle de Faces nos vazados	3	3	–	–
Controle de Aresta	3	3	–	–

Fonte: Próprio autor

* Primeira Configuração de malha

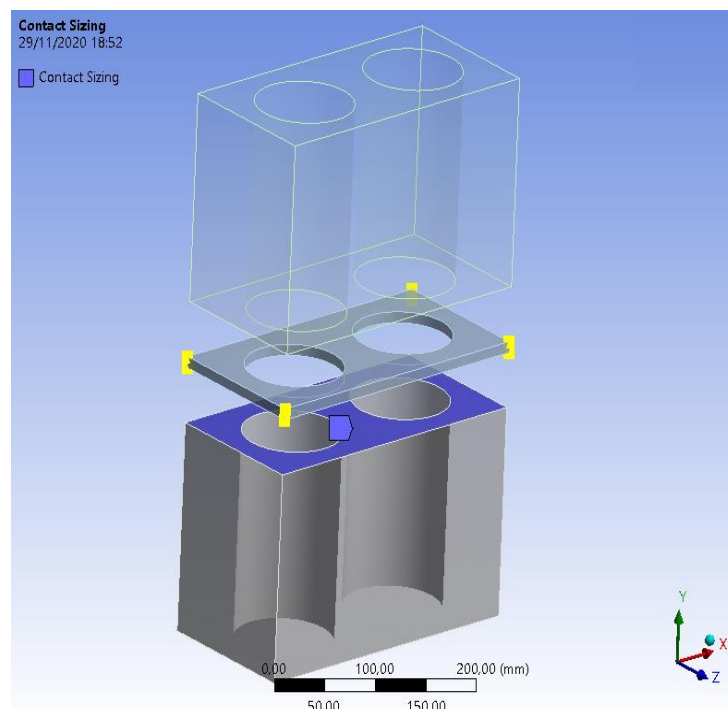
** Segunda Configuração de malha

*** Terceira Configuração de malha

**** Quarta Configuração de malha

A Figura 5.2 mostra as faces de contato entre bloco e argamassa, onde as configurações das malhas de contato foram inseridas.

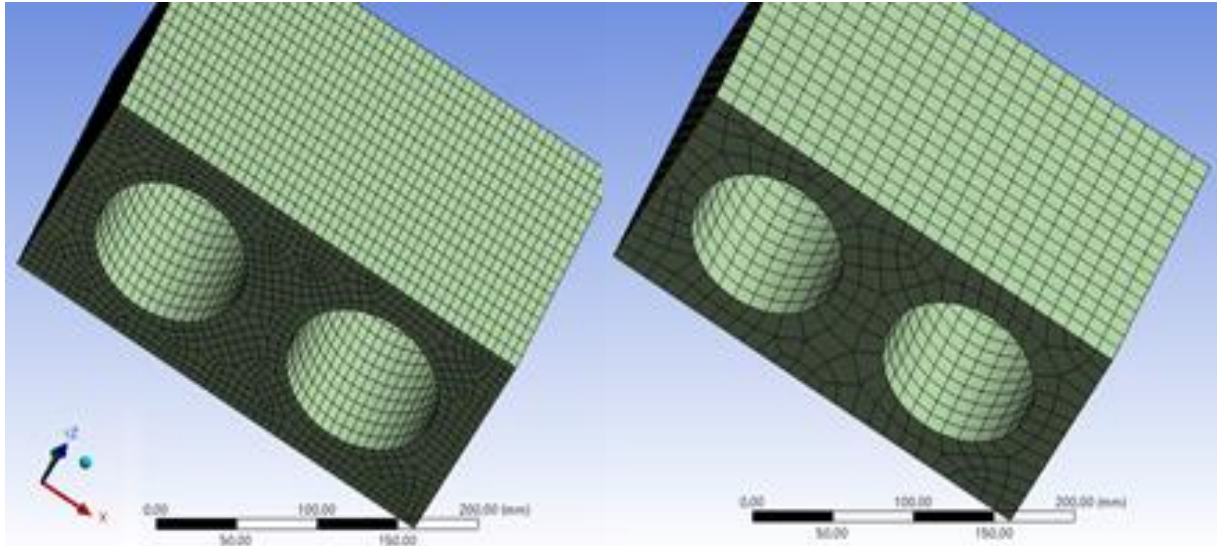
Figura 5.2 – Faces de contato entre bloco e argamassa



Fonte: Próprio autor

A Figura 5.3 mostra dois diferentes tamanhos de malha nas interfaces dos blocos. O componente argamassa foi ocultado nas imagens para melhor observação das malhas nas faces de contato do bloco.

Figura 5.3 - Malha Hexaedra com refinamento controlado nas interfaces com 6 e 12 mm



Fonte: Próprio Autor

Para esta pesquisa o parâmetro considerado para verificação da qualidade de malha foi o de qualidade dos elementos, o qual fornece uma métrica de qualidade que varia entre 0 e 1, conforme Equação 5.0, sendo 1 indicando um cubo perfeito ou quadrado, tendo uma angulação entre as arestas mais próximo possível de 90°, enquanto um valor próximo de 0 indica que o elemento tem um volume de zero ou tem uma forma mais distorcida e deformada do elemento original. Neste caso os resultados podem não ser os mais confiáveis possíveis.

Os parâmetros considerados para escolha da malha foram o tempo de processamento da análise, tensão necessária para gerar concentrações de tensão, com valores próximos às tensões de escoamento (tensão de tração) do concreto, obtidas nos ensaios experimentais nas regiões próximas as interfaces bloco argamassa e a qualidade da malha. Para isso foram feitas configurações variando o tamanho dos elementos, a tipologia da malha e a métrica “Element Quality”, a qual mede a qualidade de forma da malha criada.

Após as análises de calibração foi possível observar que todas as tipologias e discretização de malha se apresentaram com valores muito próximos.

Os valores das tensões de compressão para cada nível são dados na Tabela 5.6.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam os valores para cada configuração utilizadas na calibração da malha.

Tabela 5.3 – Parâmetros de malha tetraédrica para calibração

Método				
Configuração de refinamento	Tetraedros			
	1º *	2º *	3º ***	4º ****
Ordem da Malha	QUADRÁTICA			
Nº de Nós	287534	799276	88183	142938
Nº de Elementos	173911	534912	57076	88148
“Quality” (valor médio)	0,73358	0,81152	0,82657	0,79373
“Quality” (Desvio Padrão (%))	0,13481	0,11399	0,10077	0,11549
Tempo de Processamento (seg)	2181	8614	337	547
Nível p/ tens. Máx	2	2	N/A	N/A
Elemento Predominante	SOLID187			

Fonte: Próprio autor

* Primeiro Configuração de malha

** Segunda Configuração de malha

*** Terceira Configuração de malha

**** Quarta Configuração de malha

Tabela 5.4 – Parâmetros de malha hexa dominante dependente para calibração

Método				
Configuração de refinamento	Malha Hexaedra Dependente			
	1º *	2º **	3º ***	4º ****
Ordem da Malha	LINEAR			
Nº de Nós	55364	146823	10349	29531
Nº de Elementos	111616	170183	9044	35037
Média	0,52396	0,77599	0,82554	0,71299
Desvio Padrão (%)	0,21831	0,24757	0,20339	0,24711
Tempo de Processamento (seg)	204	534	29	86
Nível p/ tens. Máx	3	3	3	3
Elemento Predominante	SOLID185			

Fonte: Próprio autor

* Primeira Configuração de malha

** Segunda Configuração de malha

*** Terceira Configuração de malha

**** Quarta Configuração de malha

Tabela 5.5 – Parâmetros de malha hexa dominante independente para calibração

Método				
	Malha Hexaedra Independente			
	1º *	2º **	3º ***	4º ****
Ordem da Malha	LINEAR			
Nº de Nós	29508	82371	8388	30469
Nº de Elementos	20267	67112	5544	23807
Média	0,51362	0,80318	0,91489	0,71798
Desvio Padrão (%)	0,21047	0,09765	0,062302	0,090185
Tempo de Processamento (seg)	246	727	43	188
Nível p/ tens. Máx	3	2	N/A	3
Elemento Predominante	SOLID185			

Fonte: Próprio autor

* Primeira Configuração de malha

** Segunda Configuração de malha

*** Terceira Configuração de malha

**** Quarta Configuração de malha

Após as soluções para verificar a melhor configuração de refinamento de malha que seriam utilizadas nas análises das curvas tensão vs deformação, optou-se pela 2ª configuração de malha utilizando elementos Hexaedros Independentes.

Na segunda parte da pesquisa, considerando os valores aproximados das soluções numéricas para as diversas configurações de malha obtidas na primeira parte deste trabalho, optou-se por fazer somente uma discretização global dos componentes utilizando a malha Hexaedra independente e realizar uma otimização da malha fazendo uma análise de convergência das tensões nos prismas para diferentes tamanhos de malha.

Com objetivo por otimizar uma malha que fosse maior possível, porém com uma resposta satisfatório foi realizado simulações no prisma PGC I com quatro malhas de diferentes tamanhos e observado as respostas para os resultados de tensões e deformações. Os tamanhos das malhas foram determinados com 25, 20, 10 e 6 mm.

5.4 Condições de contorno

Para as condições de contorno foram definidas as restrições na base dos prismas e blocos, os carregamentos foram fixados no extremo superior dos prismas e blocos e inseridos os contatos entre os blocos de concreto e a juntas de ligação (argamassa). Não foram consideradas tensões laterais simulando o confinamento nos extremos dos prismas, como também o estado triaxial que ocorre nos contatos entre os blocos e a argamassa conforme uma parede real.

Os sistemas de coordenadas para convenção das direções positivas e negativas, definidas como padrão para esta análise, segue as coordenadas conforme Figura 5.1, sendo sentido negativo quando direção contrária às direções das coordenadas (x; y; z).

5.4.1 Carregamento

Para a primeira etapa da pesquisa os carregamentos nos prismas, nas simulações numéricas, foram realizados com 3 níveis de carga, o 1º nível foi criado aplicando uma carga de 80% das cargas média de ruptura (f_{pm}) dos prismas obtidas experimentalmente e foram utilizados com a finalidade de aplicar a carga média para

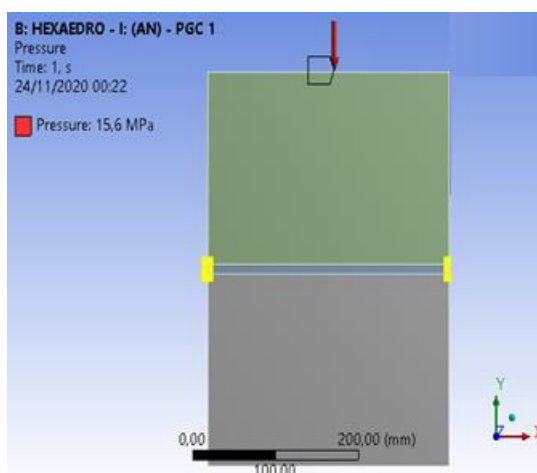
o surgimento das primeiras fissuras nos prismas. O 2º nível considera 100 % das cargas média de ruptura (f_{pm}), e o 3º nível foi uma extrapolação das cargas média de ruptura (f_{pm}).

O 2º e o 3º nível foram aplicados com o objetivo de observar a concentração de tensão máxima principal (tensão de tração) no bloco e assim observar se estas levam a concentrações de tensão de tração com valores próximos da resistência à tração do concreto.

Os valores das tensões nas análises numéricas foram aplicados como “pressão” com unidade em MPa.

A Figura 5.4 apresenta a disposição da tensão no prisma.

Figura 5.4 – Condição de carregamento no prisma



Fonte: Próprio autor

A Tabela 5.6 mostra os valores médios das tensões de ruptura do ensaio experimental e as tensões aplicadas nas pesquisas numéricas.

Tabela 5.6 – Tensões aplicadas no modelo numérico nos prismas

Prismas	σ_{rup} (MPa) * análise experimental	σ_{1^o} fissura (MPa) análise numérica		
		1 ^o	2 ^o	3 ^o
		Nível **	Nível ***	Nível****
PGC - 1	22,3	17,84	22,3	30
PGC - 2	16,24	12,992	16,24	30
PGH - 1	20,92	16,736	20,92	30
PGH - 2	21,12	16,896	21,12	30
PGR - 1	17,88	14,304	17,88	30
PGR - 2	16,27	13,016	16,27	30

Fonte: Próprio autor

* Carga de ruptura obtida experimentalmente

** Modelo linear aplicado - 80 % da carga de ruptura

*** Modelo linear aplicado - 100 % da carga de ruptura

**** Modelo linear aplicado - Carga de ruptura extrapolada

Onde:

 σ_{1^o} fissura é a tensão para início da primeira fissura no prisma $\cong 80\%$ da σ_{rup} ; e σ_{rup} é a tensão de ruptura dos ensaios experimentais.

Para as simulações considerando a plasticidade o carregamento foi realizado considerando uma carga fixa de 25 MPa para todas as simulações e as configurando com 20 Sub-etapas iniciais.

5.4.2 Restrições

Para simular o efeito da prensa nos blocos do prisma a base do prisma foi considerada como fixada, e essa condição restringe integralmente todas as possibilidades de movimentação neste local, sendo equivalente ao apoio de engastamento. A restrição de “fixação” foi inserida somente na base do prisma, pois a parte extrema superior do prisma sofre ação da pressão e deslocamento devido a ação da prensa não sofrendo restrição de movimento.

5.5 Correlações entre parâmetros

A fim de ver o quanto a variação da geometria influencia no desenvolvimento das tensões mínimas e máximas principais nos blocos, foram feitas duas análises no Ansys: análise do fator de segurança e análise de correlações paramétricas.

5.5.1 Análises dos critérios de início de fissuração - FS

O desenvolvimento das análises numéricas para os prismas de três blocos foi feito com o objetivo de observar qual geometria apresenta maior possibilidade de fissuração, considerando na pesquisa as concentrações das tensões somente no bloco central do prisma, evitando as tensões de confinamento.

As resistências dos materiais constituintes dos prismas, para cálculo dos fatores de segurança, foram configuradas conforme resistência ao escoamento à tração de cada material.

Os valores dos fatores de segurança FS foram obtidos a partir da Equação 3.6, considerando a tensão de escoamento dos materiais como limite de resistência no lugar da tensão última. As discretizações das malhas foram feitas conforme configuração de refinamento utilizado nas simulações para as relações de tensão deformação dos prismas.

5.5.2 Análises das correlações paramétricas

Com o objetivo de analisar o quanto a variação geométrica interfere nas gerações de tensões nas unidades, bloco de concreto vazado, foram realizadas análises que quantifica a influência dessas variações geométricas nos blocos de concreto. As relações foram as tensões mínimas principais, tensões de compressão no bloco, e as tensões máximas, tensões de tração na superfície superior e na superfície lateral do bloco.

As análises paramétricas foram realizadas considerando como parâmetro de entrada as variações do tamanho da abertura dos vazados nos blocos BGC I, BGH I e BGR I e as variáveis de saída foram as tensões mínimas e máximas principais nos blocos.

A partir dos parâmetros de entrada o software Ansys realiza interpolações entre os dados de entrada e saída e cria uma relação entre eles, quantificando uma força de associação linear de 1 a -1. O valor 1 representa um fator de influência direto e -1 indireto. O 0 (Zero) corresponde a influência não significativa entre os parâmetros de entrada e saída após a análise numérica.

O método matemático, utilizado pelo Software é o Coeficiente de Pearson, o qual, considera um conjunto variáveis de um número de indivíduos a serem analisados. Este coeficiente de correlação amostral é simbolizado por R^2 e avalia a associação entre duas variáveis quantitativas. Relacionando a covariância de duas variáveis com o produto de seus desvios padrões.

Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; valores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios, e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes, já para Dancey e Reidy (2005), $r = 0,10$ até $0,30$ se considera como correlação fraca; $r = 0,40$ até $0,60$ correlação moderado, $r = 0,70$ até 1 correlação forte. Independente das considerações o correto é que quanto mais perto de 1, independente do sinal, maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis (FIGUEIREDO FILHO & SILVA JUNIOR, 2009).

O coeficiente de correlação Pearson é definido conforme equação 5.1.

$$R^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

Sendo:

R^2 : Relação linear de influência entre os parâmetros relacionados nas interpolações;

x_i : Conjunto de valores variáveis de medidas de indivíduos;

y_i : Conjunto de valores variáveis de medidas dos indivíduos;

$\bar{x}$: Média de valores variáveis de medidas de indivíduos;

$\bar{y}$: Média de valores variáveis de medidas de indivíduos; e

i : Número de unidades a serem estudadas.

6 RESULTADOS

6.1 Parâmetros das malhas obtidos na solução numérica

Os parâmetros das malhas nas simulações dentro do regime linear elástico dos materiais são mostrados nas Tabelas 6.1 a 6.3.

Tabela 6.1 – Parâmetros da malha Hexaédrica Independente

Configuração da Malha Hexaédrica Independente				
Geometria	Qualidade da Malha		Nº de Nós	Nº de Elementos
	Média	Desv. Padrão		
PGC I	0,8023	0,0984	159960	133032
PGC II	0,8089	0,1013	155815	127424
PGH I	0,8129	0,1121	169755	140544
PGH II	0,8210	0,1071	162835	132176
PGR I	0,7958	0,1182	153185	122728
PGR II	0,8138	0,1073	157310	126532

Fonte: Próprio Autor

Tabela 6.2 – Parâmetros da malha Tetraédrica

Configuração da Malha Tetraédrica				
Geometria	Qualidade da Malha		Nº de Nós	Nº de Elementos
	Média	Desv. Padrão		
PGC I	0,8114	0,1142	800734	536082
PGC II	0,8047	0,1164	750747	495130
PGH I	0,8136	0,1123	745038	498387
PGH II	0,8062	0,1148	687084	451981
PGR I	0,8091	0,1128	735923	486544
PGR II	0,8080	0,1136	724984	476578

Fonte: Próprio Autor

Tabela 6.3 – Parâmetros da malha Hexaédrica Dependente

Configuração da Malha Hexaédrica Dependente				
Geometria	Qualidade da Malha		Nº de Nós	Nº de Elementos
	Média	Desv. Padrão		
PGC I	0,7800	0,2445	147566	170882
PGC II	0,7762	0,2480	141288	162847
PGH I	0,7547	0,2596	160662	189610
PGH II	0,7513	0,2565	152384	180710
PGR I	0,7875	0,2560	162438	182808
PGR II	0,7201	0,2552	161304	180654

Fonte: Próprio Autor

Conforme se observa nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, o parâmetro de malha hexa dominante independente foi o que apresentou a melhor calibração. O valor médio de qualidade de malha aproximou-se de 0,81 onde 1 representa o elemento perfeito, enquanto a configuração de malha com predominância de elemento Hexaedro Dependente apresentou uma média de 0,76.

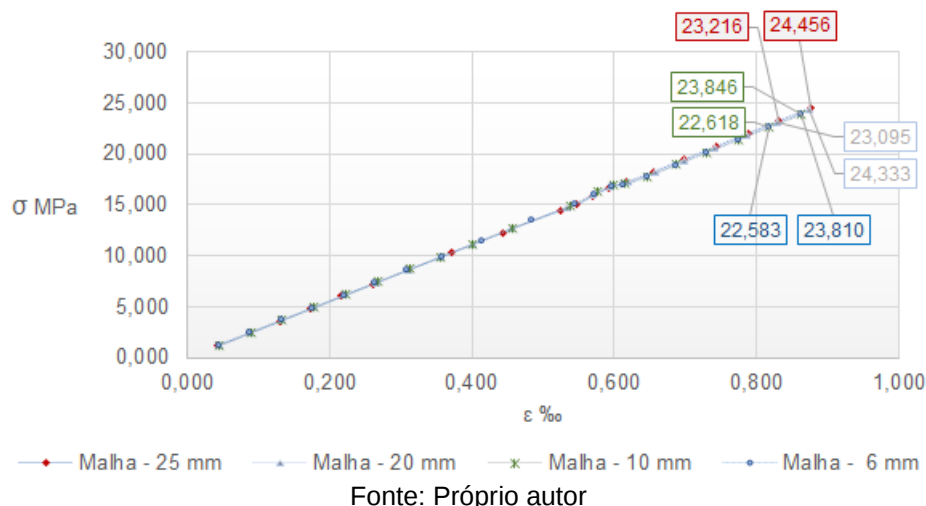
A média da métrica de qualidade de malha para os elementos Tetraedros foi a mesma apresentada pela configuração com Hexaedro Independente aproximadamente 0,81, porém a malha com Hexaedros Independentes criou uma malha com número de elementos 73,4% menor que a malha tetraédrica, exigindo assim menor esforço computacional, além de desenvolver uma melhor concentração de tensões ao longo das faces analisadas nos prismas de dois blocos.

A malha Hexaédrica Independente também foi a que apresentou o melhor valor médio de desvio padrão, uma média de 57,6% menor que a malha Tetraédrica e 5,8% menor que a malha Hexaédrica Dependente.

Conforme já descrito nas simulações considerando a plasticidade dos materiais foi aplicada a malha Hexaédrica Independente e para determinar o tamanho da malha foi feito uma convergência das curvas de tensão vs deformação.

A Figura 6.1 apresenta as soluções das curvas tensão vs deformação relativas as malhas de 25 mm, 20 mm, 10 mm e 6 mm.

Figura 6.1 – Convergência das malhas 25, 20, 10 e 6 mm



Conforme verificado os resultados para a malha com 10 mm e 6 mm apresentaram uma convergência de malha com uma diferença para as tensões no prisma menor que 0,15%, portanto a malha de 10 mm foi reputada como suficiente para as análises de simulação numérica nos prismas de dois blocos.

6.2 Convergência das curvas de tensão vs deformação das análises numéricas e experimentais

A Tabela 6.4 traz os resultados das deformações verticais obtidas experimentalmente pelos extensômetros nos ensaios executados por Bortoletto (2020) e as deformações verticais obtidas numericamente no local indicado conforme Figura 4.15. As comparações foram feitas considerando as tensões do início de fissuração de cada prisma, tanto para os ensaios experimentais, quanto para as simulações numéricas conforme exposto na tabela abaixo.

Para a comparação foram considerados os mesmos locais de aferição das tensões e deformações, local do extensômetro no bloco inferior, e as mesmas tensões para início de fissuração obtido nos ensaios experimentais e numérico.

Tabela 6.4 – Deformação vertical numérica e experimental

	PGC 1 15,33 MPa	PGC 2 12,81 MPa	PGH 1 16,50 MPa	PGH 2 16,72 MPa	PGR 1 14,10 MPa	PGR 2 12,86 MPa
Análises Experimentais	0,54075	0,37024	1,10964	0,67778	0,31722	0,51823
	0,43015	0,65871	0,44800	0,41693	1,01863	0,44169
	0,76184	0,49635	0,63917	1,04914	0,43872	0,47046
	0,53902	0,36909	0,74799	0,41693	0,43700	0,55163
	0,50849	0,49405	0,52173	0,67778	0,52284	0,69795
	0,50446	0,31897	0,44454	0,61326	0,37912	0,51823
	0,51296	0,45315	0,63917	0,74279	0,44973	0,45608
	0,58793	0,49635	0,75145	0,41918	0,31722	0,68403
	0,56206	0,45603	0,80719	0,65876	0,37720	0,51994
	0,57987	0,65871	0,44397	0,70944	0,59942	0,51593
Média	0,55275	0,47717	0,65528	0,63820	0,48571	0,53742
Coef. Var.	0,14810	0,22580	0,30430	0,28670	0,40350	0,15480
Análises numéricas	TETRAEDRO	0,55116	0,46074	0,59182	0,59941	0,50450
	HEXAEDRO - D	0,55093	0,46071	0,59175	0,59943	0,50439
	HEXAEDRO - I	0,55121	0,46091	0,59175	0,59943	0,50439
Méd. Ansys	0,55110	0,46079	0,59177	0,59942	0,50443	0,45998
Média/Méd. Ansys	100,30%	103,55%	110,73%	106,46%	96,29%	116,83%

Fonte: Próprio autor

Conforme resultados apresentados pela Tabela 6.4 foi possível observar uma boa correlação entre as médias das deformações das análises numéricas e experimentais, para uma carga solicitante com valor aproximado de 80% da carga de ruptura para cada geometria de prisma.

Dentre os resultados o prisma PGC 1 apresentou praticamente as mesmas deformações nos pontos de medidas dos extensômetros com uma aproximação de

aproximadamente 0,30% e o PGR 2 com a maior diferença de aproximadamente 16,8 %.

As diferenças das correlações entre as soluções numéricas e os resultados experimentais das relações de tensão deformação para os prismas PGC 1, PGC 2, PGH 2 e PGR 1 se apresentaram melhores do que as correlações experimentais e numéricas de Albertini (2009), porém é muito importante esclarecer que a pesquisa citada de Albertini (2009) considerou a não linearidade física dos materiais como também a carga de ruptura em seus ensaios e simulações. Para a presente pesquisa a curva tensão vs deformação do prisma se deu somente no regime linear-elástico dos materiais e não foi considerado critérios de rupturas dos materiais. Para as diferenças apresentadas das soluções dos prismas PGH 1 e PGR 2 as correlações de Albertini foram melhores.

Relativo aos resultados de Santos *et al.* (2017), as correlações são parecidas ao que acontece com Albertini, porém Santos *et al.* (2017) comparam as resistências à compressão e módulo de deformação e não a relação tensão deformação. Observando que os dois trabalhos citados utilizam softwares e modelagens diferentes do utilizado para esta pesquisa.

Assim como nos resultados de Gisbert (2018), consegue-se ver os mesmos comportamentos para as concentrações de tensão na argamassa e bloco de concreto nos prismas, onde as maiores concentrações de tensão ocorrem nas interfaces bloco-argamassa e nas paredes dos vazado. Essas observações podem serem feitas analisando os gráficos tridimensionais das tensões mínimas como também os gráficos dos FS.

Os gráficos representando as convergências das curvas de tensão vs deformação das simulações numéricas comparadas as análises experimentais são mostradas nas Figuras 6.2 a 6.13

Devido aos valores muito próximos das relações de tensão deformação, no regime linear, para as análises numéricas não é possível a visualização das curvas de tensão vs deformação divergentes para os três métodos usados na criação da malha, tornando impossível visualizar as relações numéricas separadamente num mesmo gráfico.

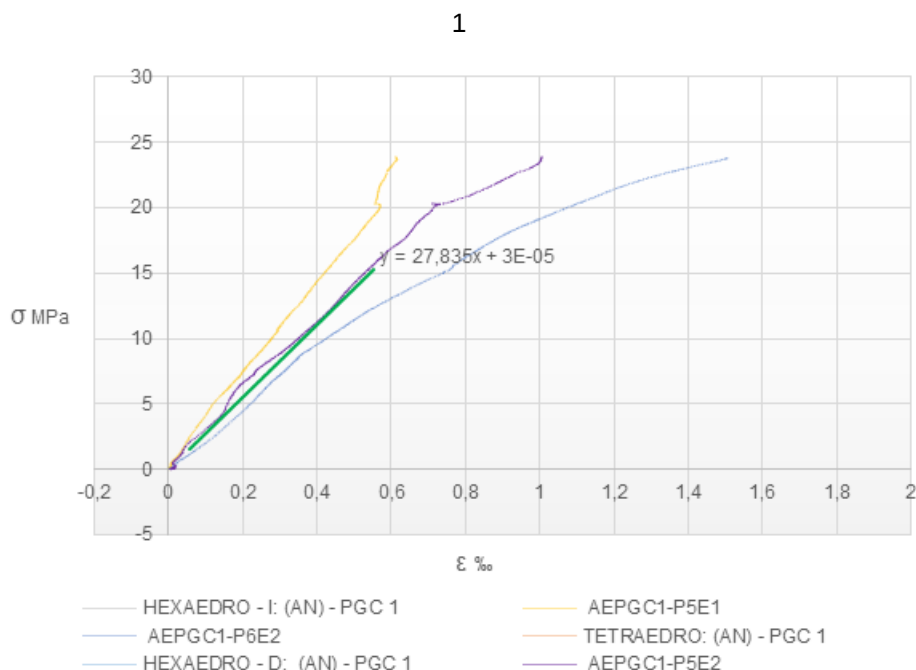
Para que fosse possível a visualização de cada curva tensão vs deformação para cada configuração de malha e suas respectivas geometrias foi colocado no Apêndice A todos os gráficos das curvas de tensão vs deformação das análises

numéricas com as análises experimentais, como também todas as configurações de malhas utilizadas nesta pesquisa.

Na Figura 6.2 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGC1 usando: análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO – I: (AN); PGC1; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGC1-P6E2; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO – D: (AN); PGC1; análise experimental – prisma de número 5 e extensômetro 1, AEPGC1-P5E1;

análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGC1; análise experimental – prisma de número 5 e extensômetro 2, AEPGC1-P5E2.

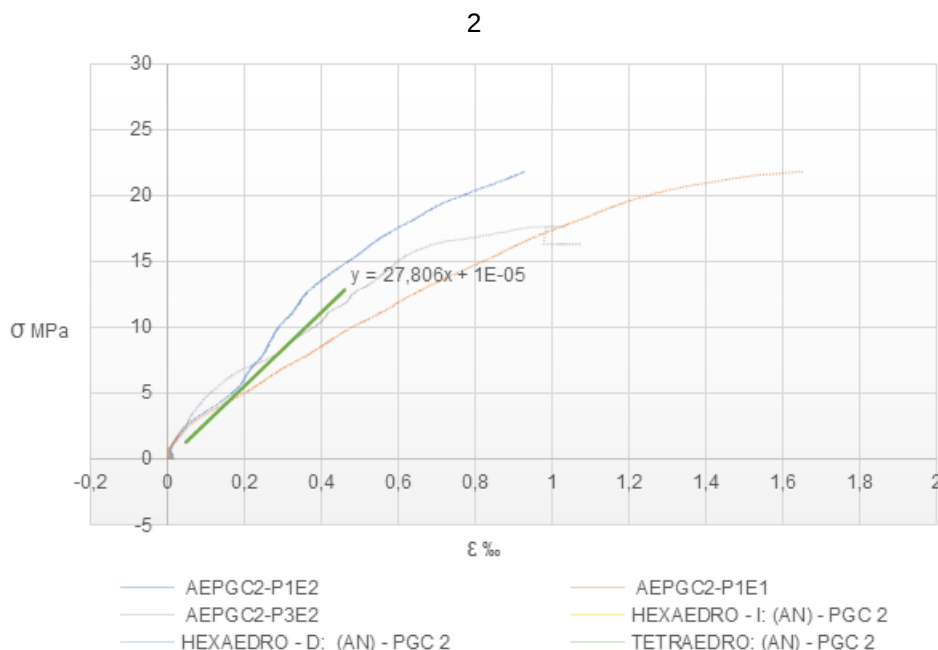
Figura 6.2 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC



Na Figura 6.3 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGC2 usando: análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 2, AEPGC2-P1E2; análise experimental – prisma de número 3 e extensômetro 2, AEPGC2-P3E2; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO – D: (AN) – PGC2;

análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGC2-P1E1; análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO – I: (AN) – PGC2; análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGC2.

Figura 6.3 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC

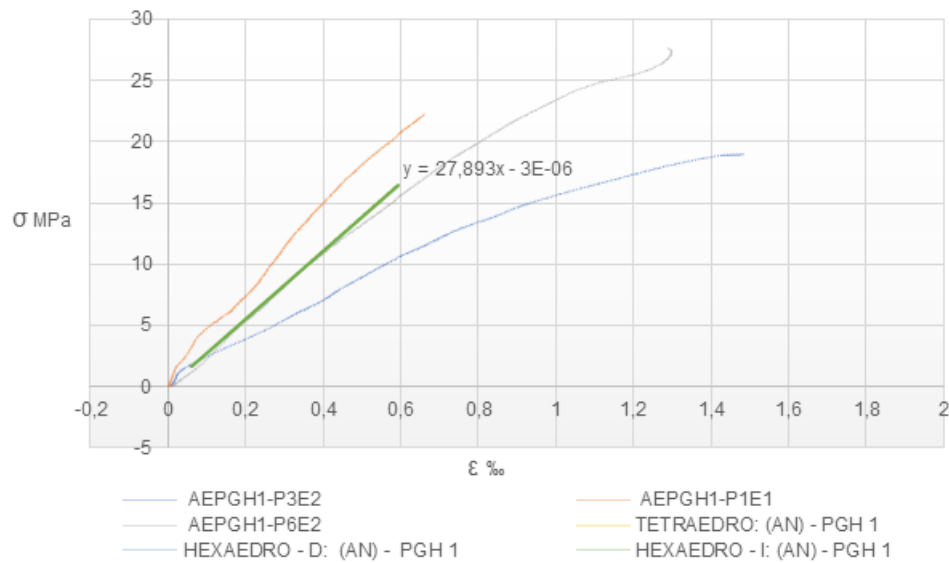


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 6.4 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGH1 usando: análise experimental – prisma de número 3 e extensômetro 2, AEPGH1 - P3E2; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGH1 - P6E2; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO – D: (AN) – PGH1; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGH1-P1E1; análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGH1; análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO – I: (AN) – PGH1.

Figura 6.4 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH

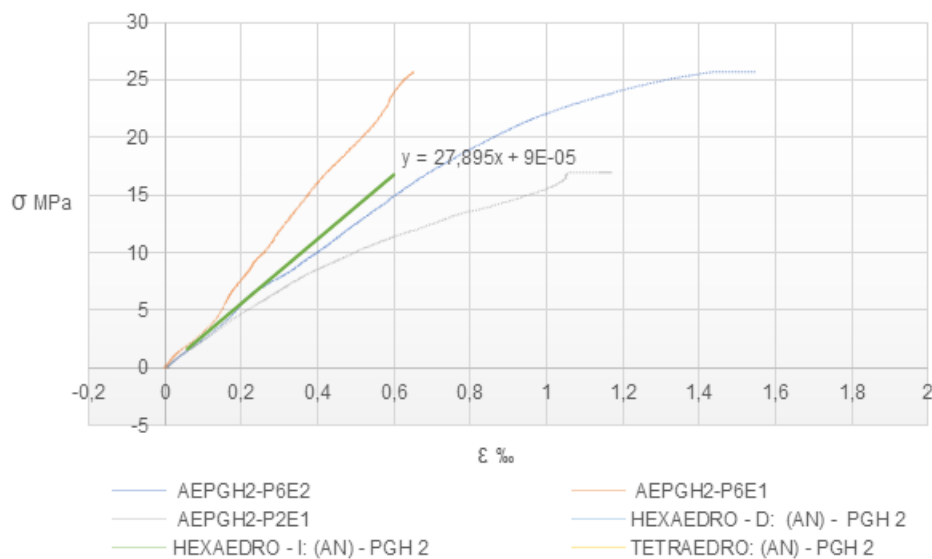
1



Fonte: Próprio Autor

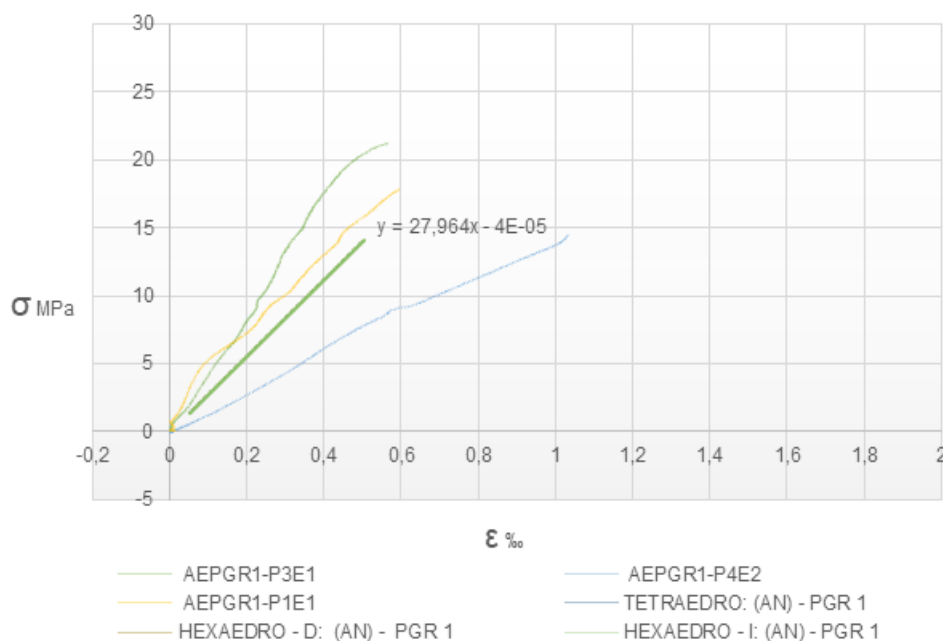
Na Figura 6.5 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGH2 usando: análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGH2 - P6E2; análise experimental – prisma de número 2 e extensômetro 1, AEPGH2 - P2E1; análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO - I: (AN) – PGH2; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 1, AEPGH2-P6E1; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO - D: (AN) – PGH2;; análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGH2.

Figura 6.5 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 2



Na Figura 6.6 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGR1 usando: análise experimental – prisma de número 3 e extensômetro 1, AEPGR1 - P3E1; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGR1 – P1E1; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO – D: (AN) – PGR1; análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 2, AEPGR1- P4E2; análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGR1; análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO – I: (AN) – PGR1.

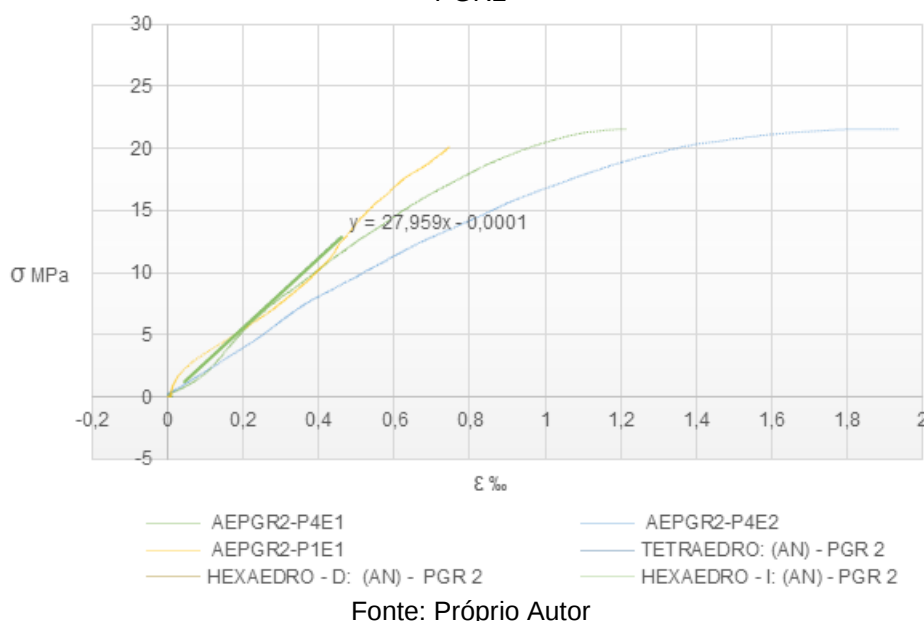
Figura 6.6 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR1



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 6.7 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGR2 usando: análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 1, AEPGR2 - P4E1; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGR2 - P1E1; análise numérica com malha Hexaédrica Dependente, HEXAEDRO - D: (AN) – PGR2; análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 2, AEPGR2- P4E2; análise numérica com malha Tetraédrica, TETRAEDRO: (AN) – PGR2; análise numérica com malha Hexaédrica Independente, HEXAEDRO - I: (AN) – PGR2.

Figura 6.7 – Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR2



As relações entre as duas análises mostraram uma boa convergência entre os resultados experimentais e numéricos, observando que todas as análises do comportamento mecânico do prisma foram realizadas dentro do regime elástico linear.

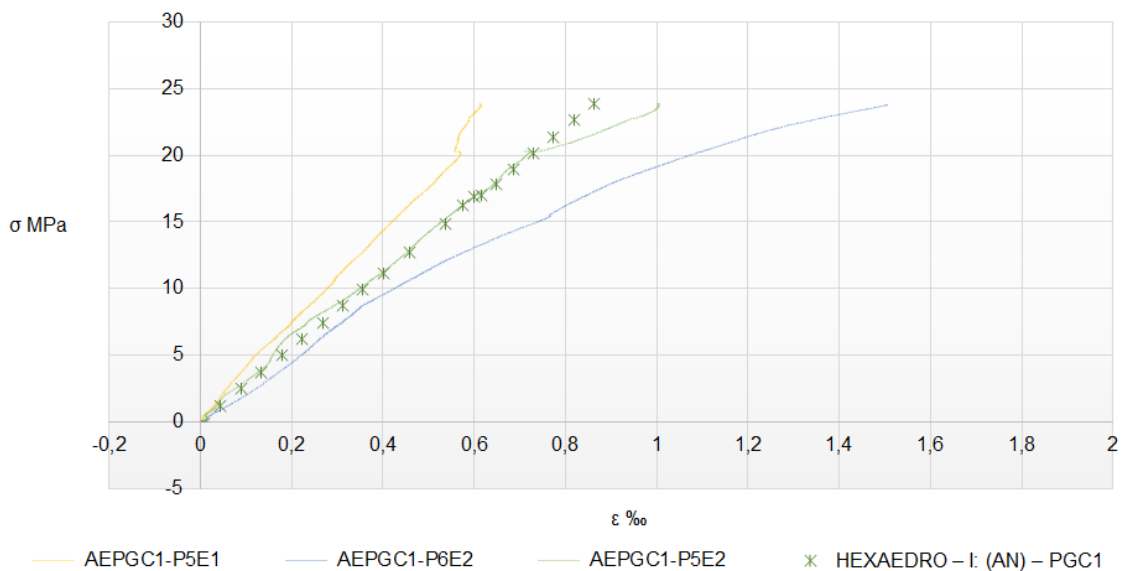
Para critério de comparação no gráfico de dispersão foram considerados os dados com duas curvas extremas dos resultados experimentais, uma com máxima deformação e mínima tensão, outra com máxima tensão e mínima deformação e, uma curva intermediária, ou seja, foram utilizadas nas comparações as maiores e menores inclinações de cada linha de dispersão das análises experimentais, e uma intermediária e as soluções numéricas se desenvolveram em valores dentro desses limites de inclinações no gráficos das análises experimentais, conforme era esperado.

Os gráficos mostrados nas Figuras 6.8 a 6.13 retratam as curvas de tensão vs deformação para a segunda parte do trabalho, em que se considerou a plasticidade dos materiais.

Na Figura 6.8 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGC1 usando: análise experimental – prisma de número 5 e extensômetro 2, AEPGC1-P5E2; análise experimental – prisma de número 5 e extensômetro 1, AEPGC1-P5E1; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGC1-P6E2

e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) - PGC1.

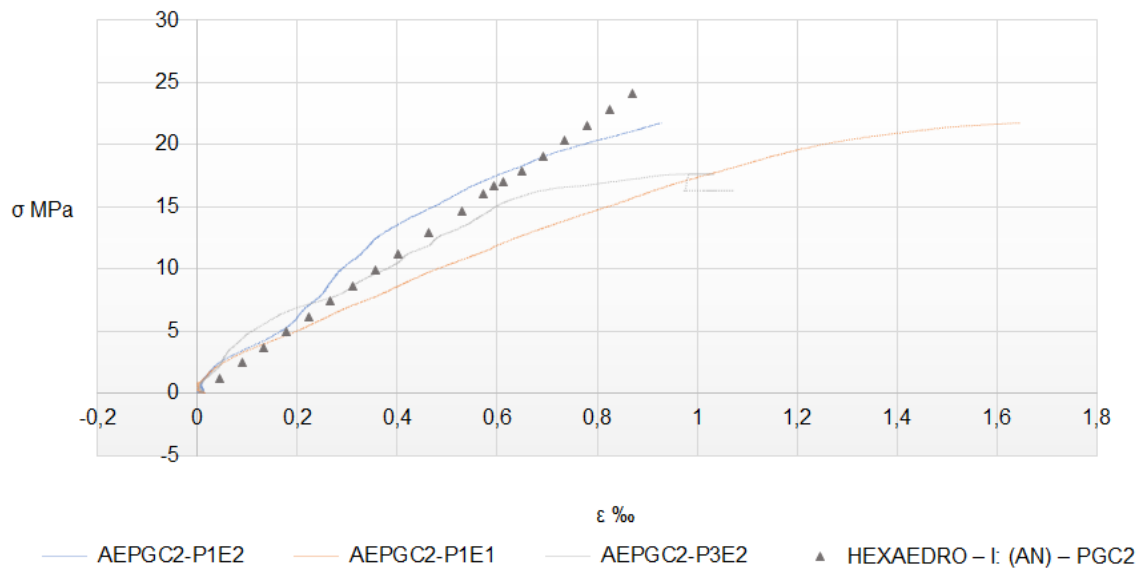
Figura 6.8 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 6.9 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGC2 usando: análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 2, AEPGC2-P1E2; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGC2-P1E1; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGC2-P6E2 e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) – PGC2.

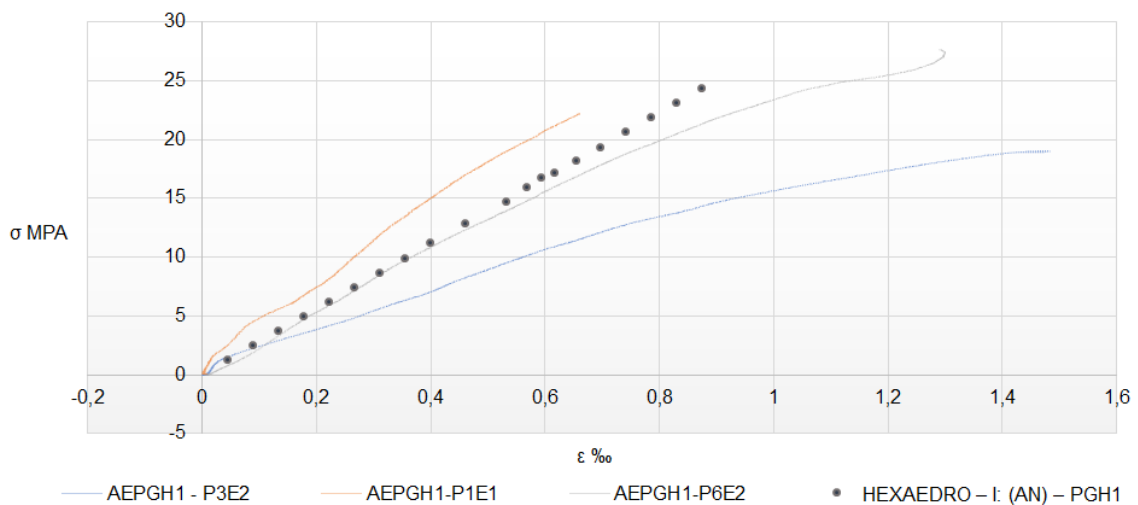
Figura 6.9 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC2 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 6.10 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGH1 usando: análise experimental – prisma de número 3 e extensômetro 2, AEPGH1 - P3E2; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGH1-P1E1; análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGH1-P6E2 e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) – PGH1.

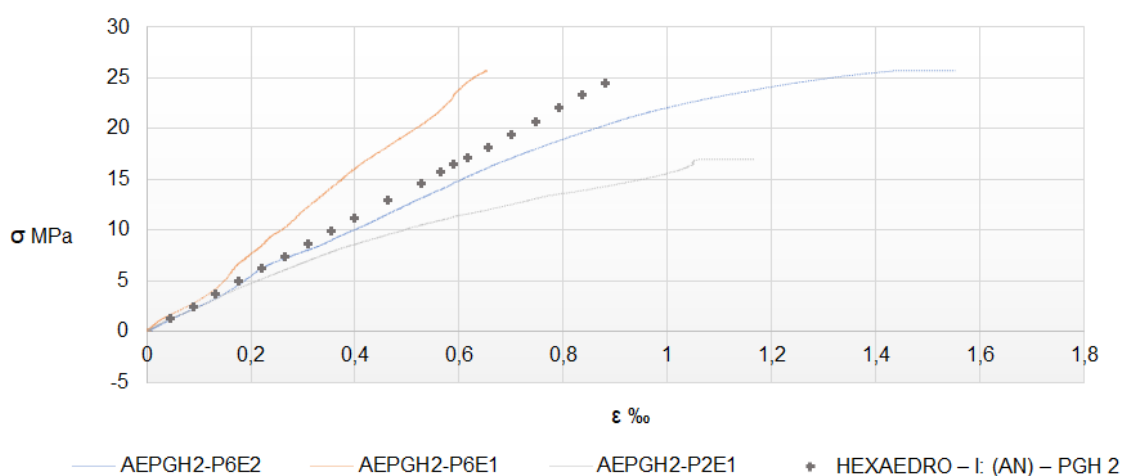
Figura 6.10 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH1 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 6.11 tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGH2 usando: análise experimental – prisma de número 6 e extensômetro 2, AEPGH2-P6E2; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGH2-P1E1; análise experimental – prisma de número 2 e extensômetro 1, AEPGH2-P2E1e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) – PGH2.

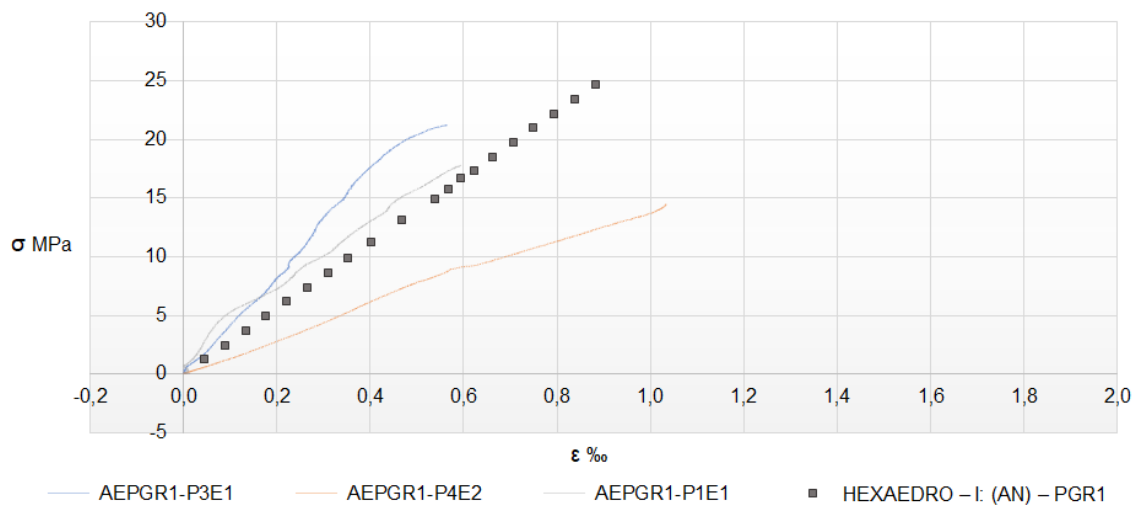
Figura 6.11 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH2 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 6.12, tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGR1 usando: análise experimental – prisma de número 3 e extensômetro 1, AEPGR1-P3E1; análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 2, AEPGR1-P4E2; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGR1-P1E1 e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) – PGR1.

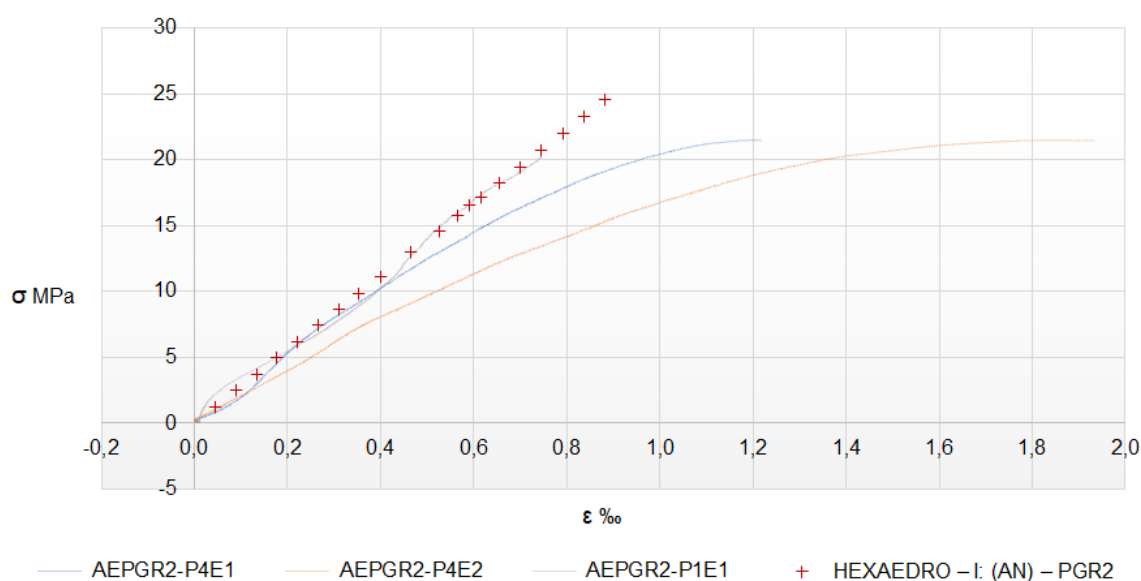
Figura 6.12 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR1 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 6.13, tem-se os resultados da tensão deformação dos prismas PGR1 usando: análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 1, AEPGR2-P4E1; análise experimental – prisma de número 4 e extensômetro 2, AEPGR2-P4E2; análise experimental – prisma de número 1 e extensômetro 1, AEPGR2-P1E1 e análise numérica com malha Hexaedra Independente com tamanho de 10 mm, HEXAEDRO – I: (AN) – PGR2.

Figura 6.13 - Gráfico da Curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR2 para o comportamento plástico do material



Fonte: Próprio Autor.

6.3 Tensões principais nos blocos

As tensões principais desenvolvidas nos prismas foram analisadas considerando somente as regiões próximas da interface entre bloco e argamassa para o bloco inferior, essa consideração foi feita para evitar erros de verificação das tensões de confinamento que ocorre na base do prisma inferior devido a condição de contorno definida na simulação numérica, onde se fixa a parte inferior do prisma restringindo integralmente suas possibilidades de movimentação, gerando assim uma tensão aproximada no local muito distante do real. Para o bloco superior todo o componente foi considerado.

No Apêndice B são apresentados todos os gráficos tridimensionais das tensões principais mínimas e máximas com todas as configurações de malha Tetraédricas e Hexaédricas estão.

No Apêndice C estão os gráficos das correlações lineares paramétricas da influência entre os parâmetros de entrada e saída nas análises das tensões nos blocos BGC I, BGH I e BGR I.

No Apêndice D foram expostos os gráficos tridimensionais, para comparação, das tensões principais máximas desenvolvidas nos prismas e as imagens das fissuras e ruptura dos prismas ensaiados experimentalmente por Bortoletto (2020).

6.3.1 Soluções numéricas das tensões principais mínimas e máximas para os prismas de dois blocos

Conforme soluções mostradas, através dos gráficos tridimensionais, no apêndice B, nota-se que, de modo geral, tanto as tensões mínimas principais, quanto as máximas principais se apresentam com maiores concentrações próximas as interfaces bloco-argamassa, com aumento da concentração de tensão caminhando para o septo central na face externa do bloco superior e na parte interna do prisma ocorre uma tendência de maior concentração na área correspondente a abertura do vazado nas paredes laterais e septos laterais e centrais.

Observa-se que quando corre um aumento da abertura do vazado nos prismas as tensões principais máximas tendem a serem mais próximas das máximas

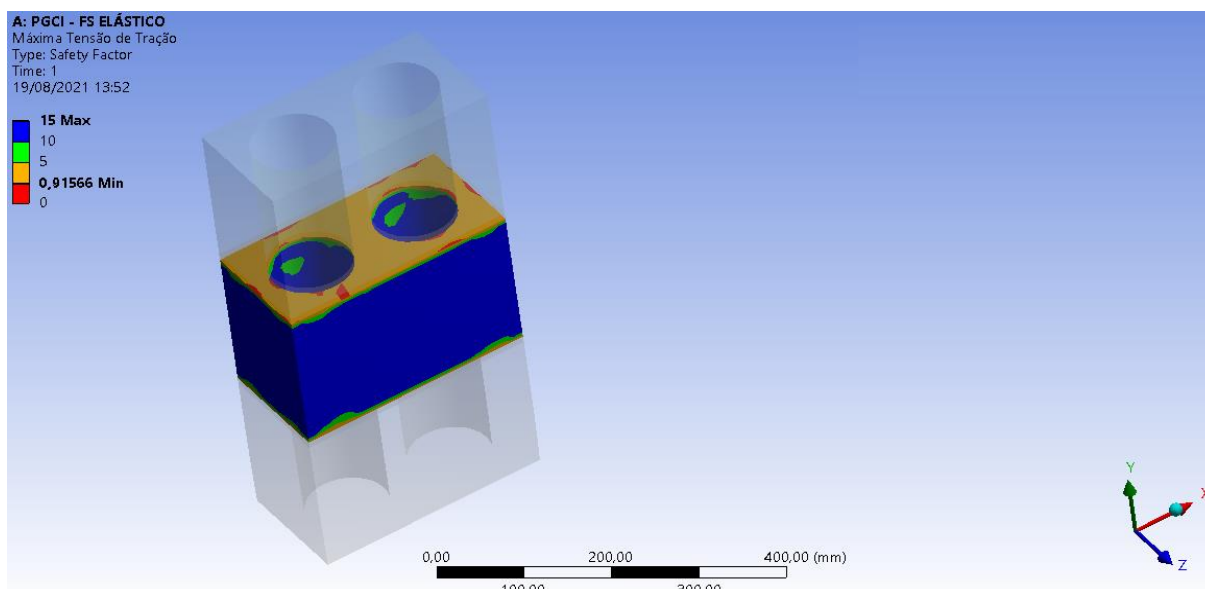
tensões (limite de escoamento do material) e com valores mais uniformes na face da interface dos blocos com a argamassa.

6.4 Critério de início de fissuração FS

As Figuras 6.14 a 6.25 mostram os critérios de início de fissuração FS para as configurações definidas no item 4.7, em que a modelagem para o critério FS foi feita com base no critério de Rankini, sendo, portanto, os valores de FS uma relação entre as resistências à tração dos componentes do prisma com as tensões de tração geradas em todos os pontos discretizados dos prismas.

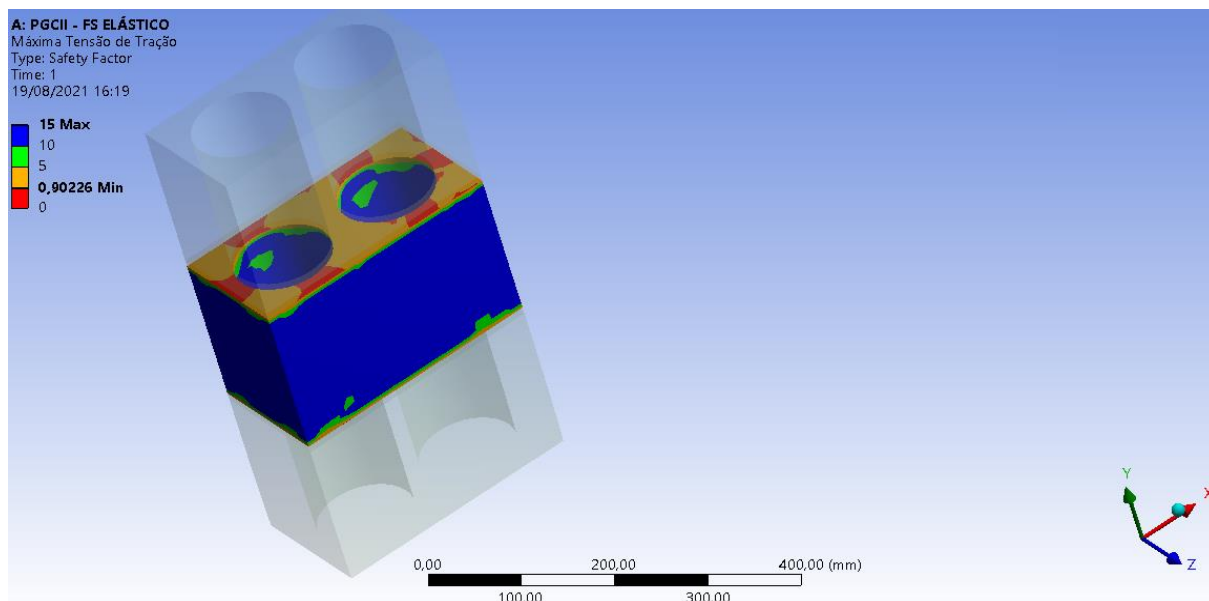
Os gráficos 6.14 a 6.25 mostram que os menores FS se apresentam próximos as faces de contato entre o bloco e argamassa, sendo possível observar em cada gráfico os menores FS, os quais são plotados na cor vermelha, possibilitando ver também os pontos próximos aos vazados como no prisma PGC I (Fase elástica) na Figura 6.14, como em toda face de contato como ocorre no prisma PGC I (Fase plástica) na Figura 6.25.

Figura 6.14 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGC I - FS ELÁSTICO



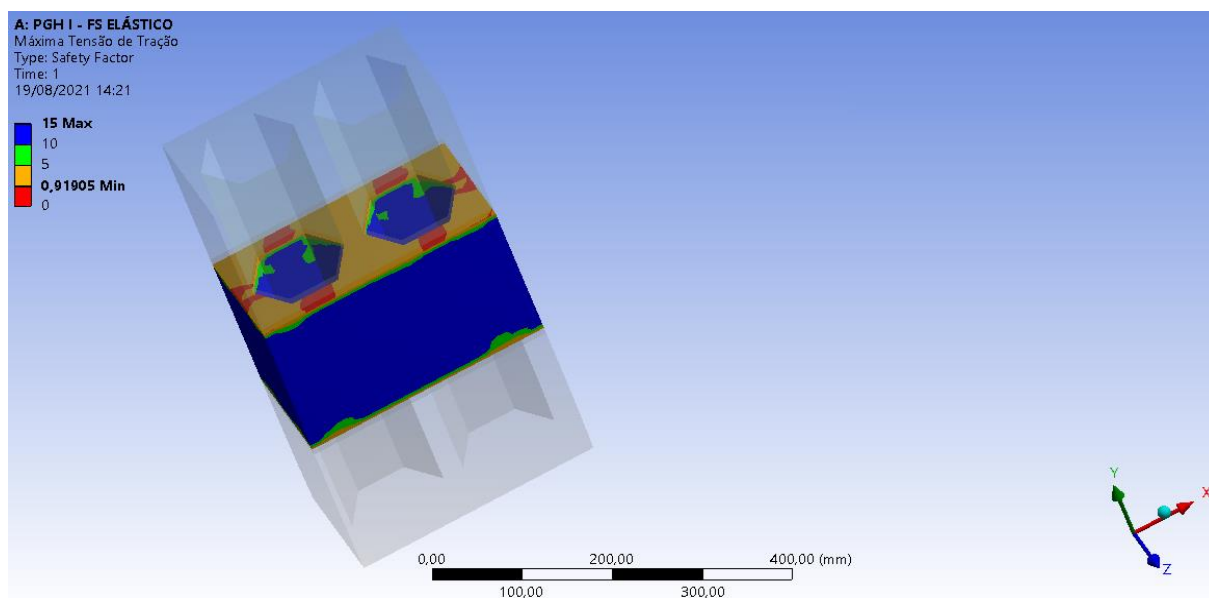
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.15 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGC II - FS ELÁSTICO



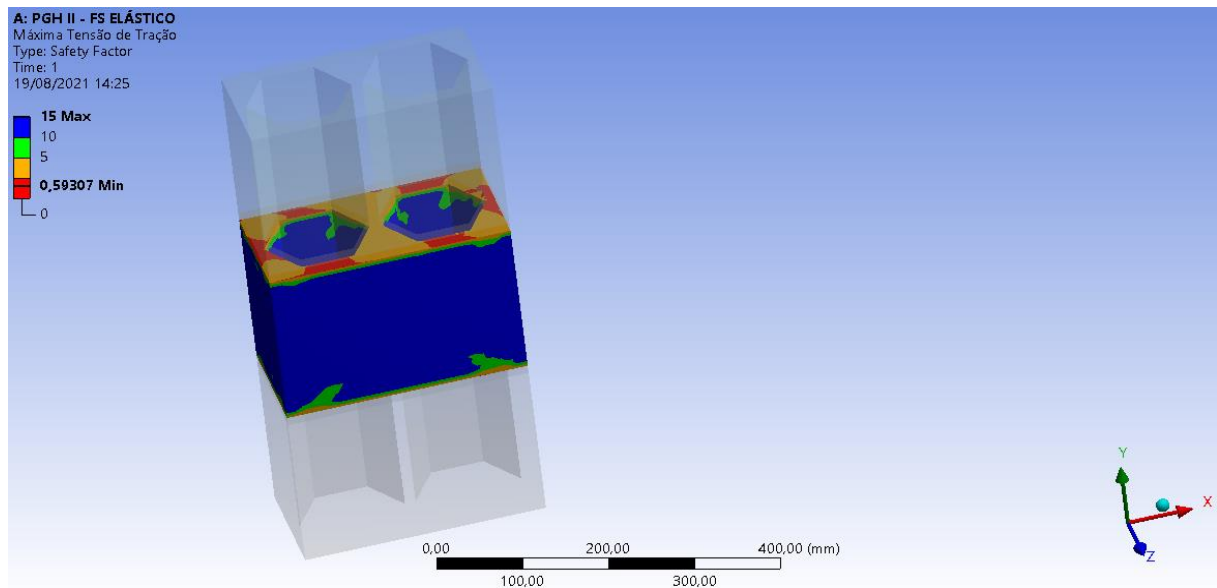
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.16 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGH I - FS ELÁSTICO



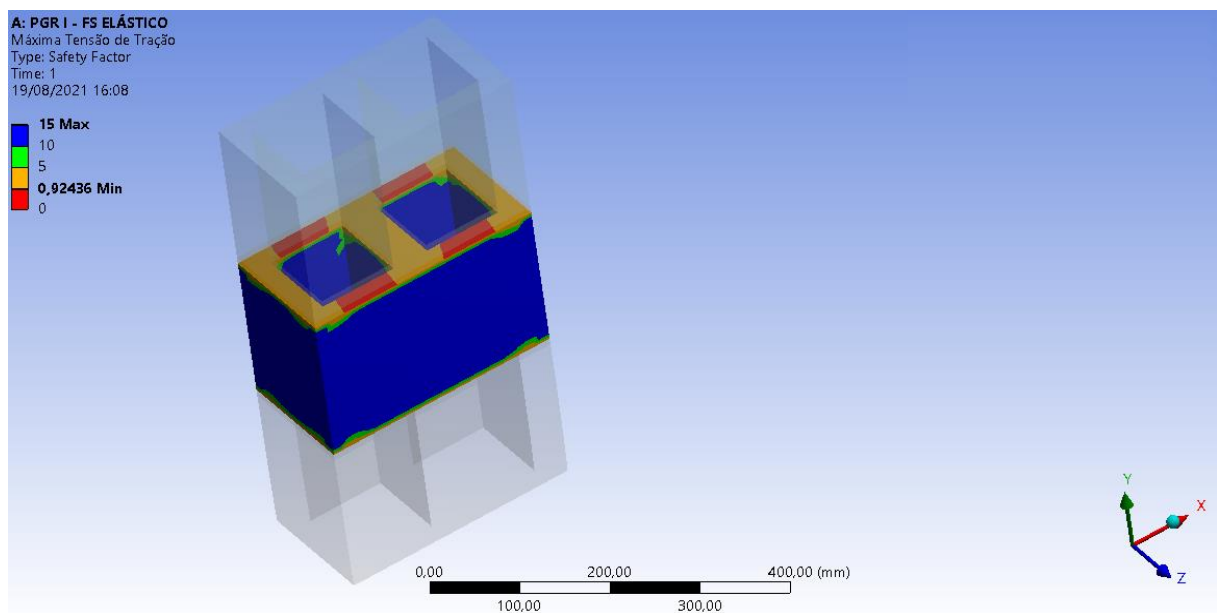
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.17 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGH II - FS ELÁSTICO



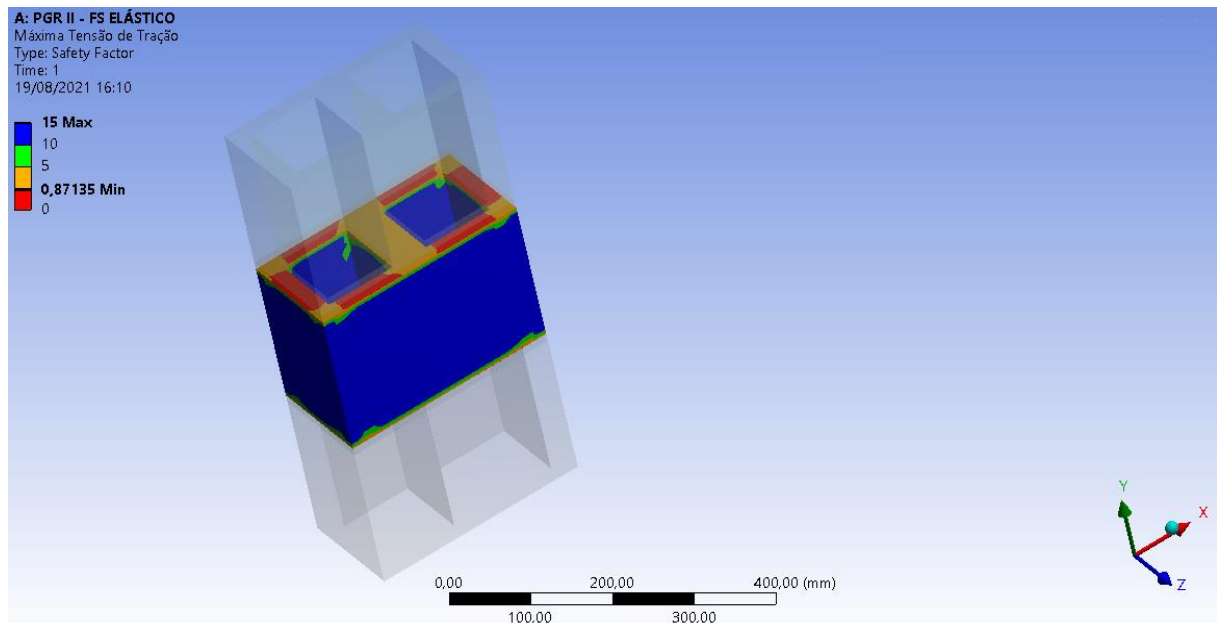
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.18 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGR I - FS ELÁSTICO



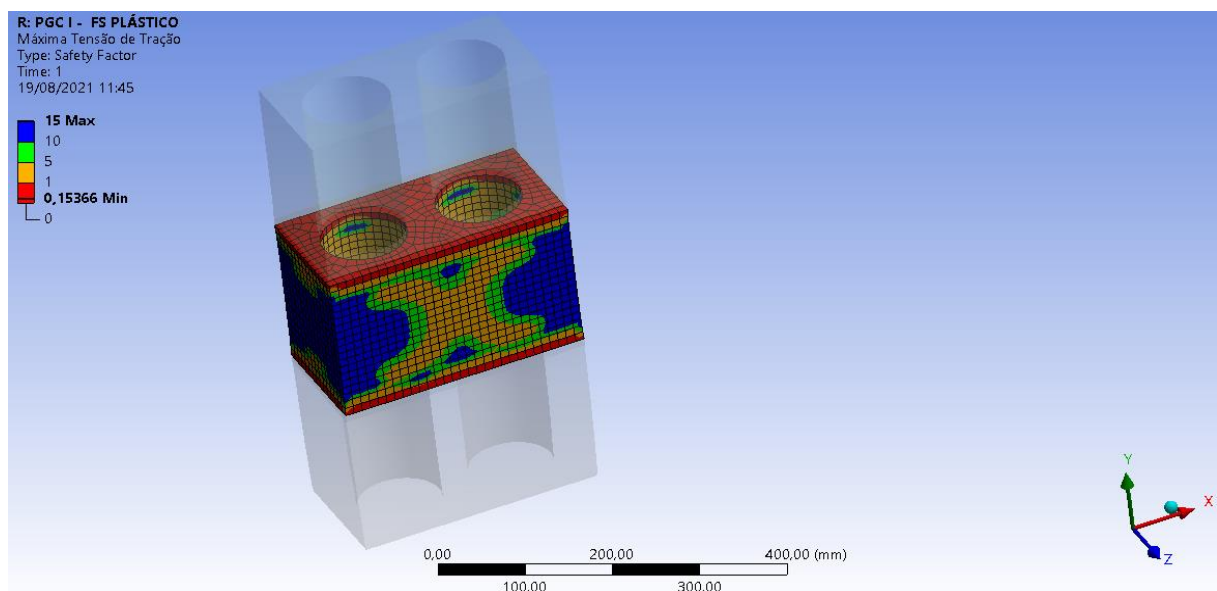
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.19 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGR II - FS ELÁSTICO



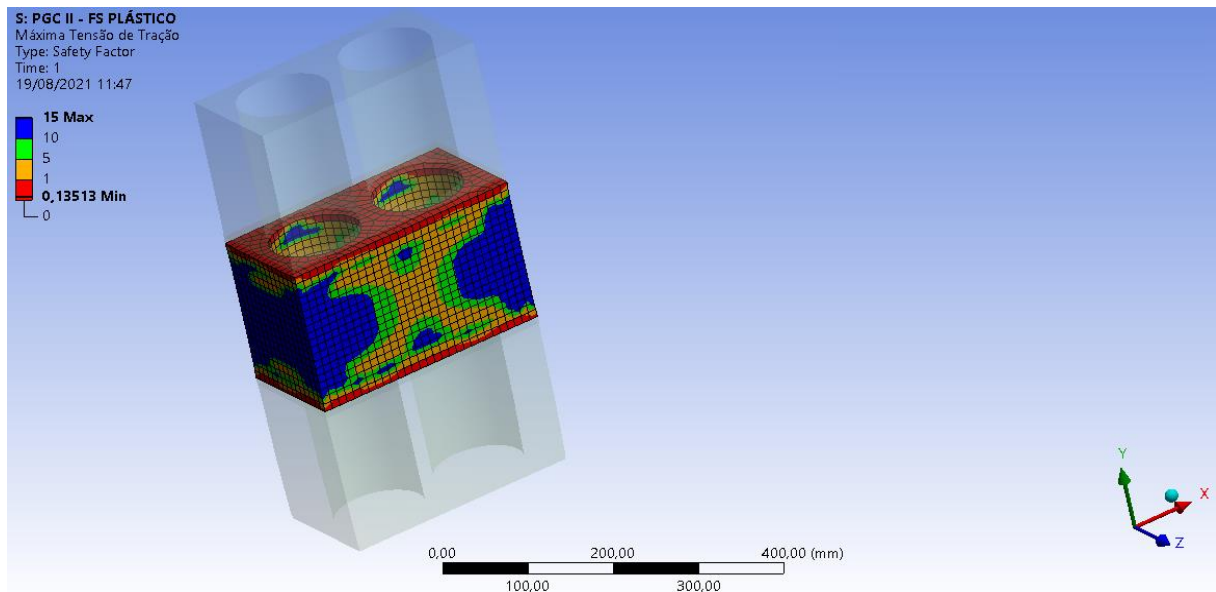
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.20 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGC I - FS PLÁSTICO



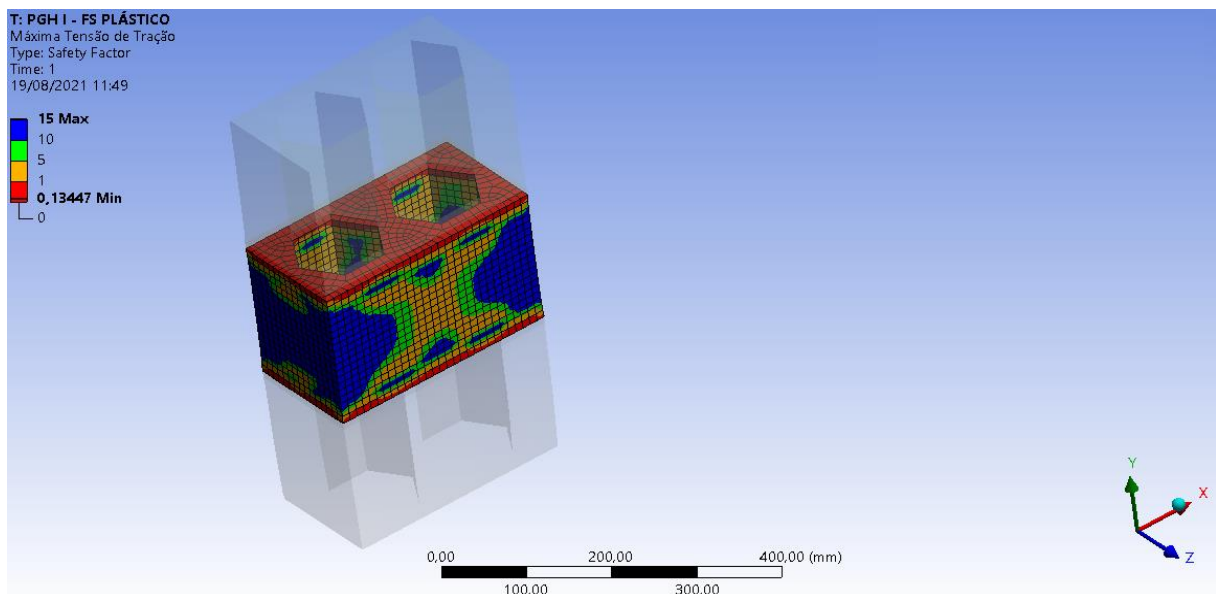
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.21 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração – PGC II – FS PLÁSTICO



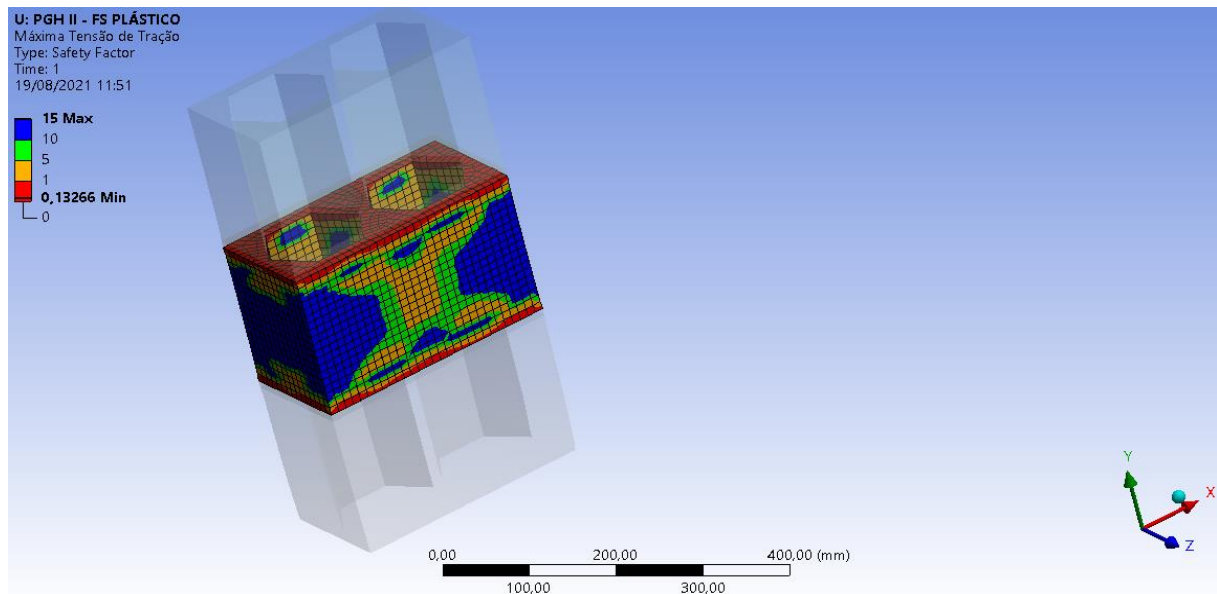
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.22 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGH I - FS PLÁSTICO



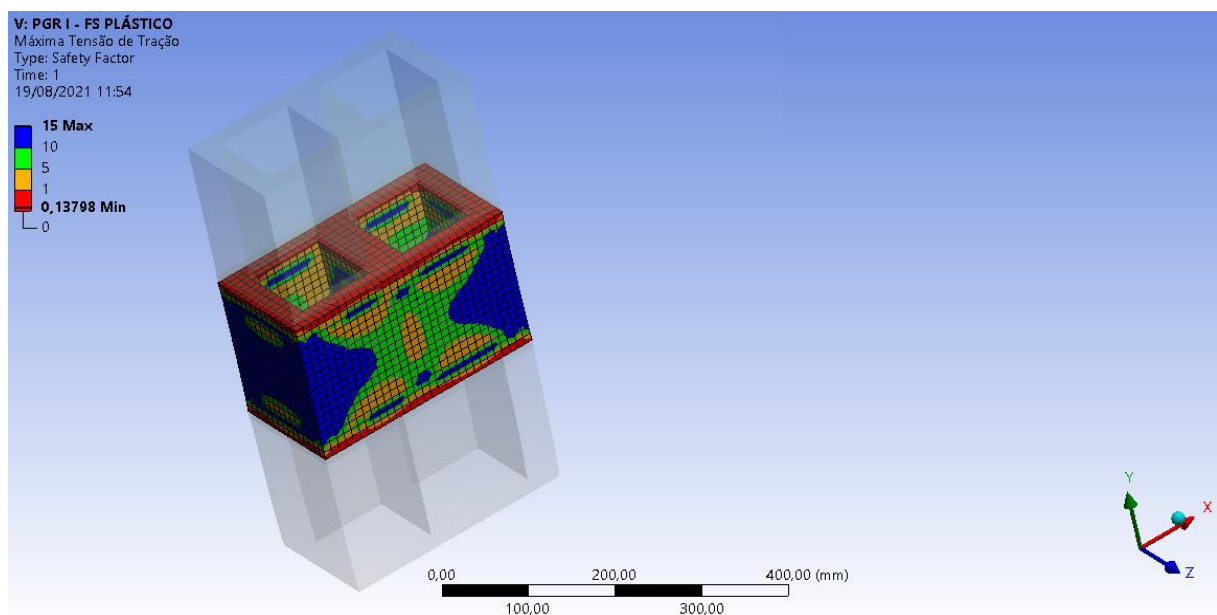
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.23 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGH II - FS PLÁSTICO



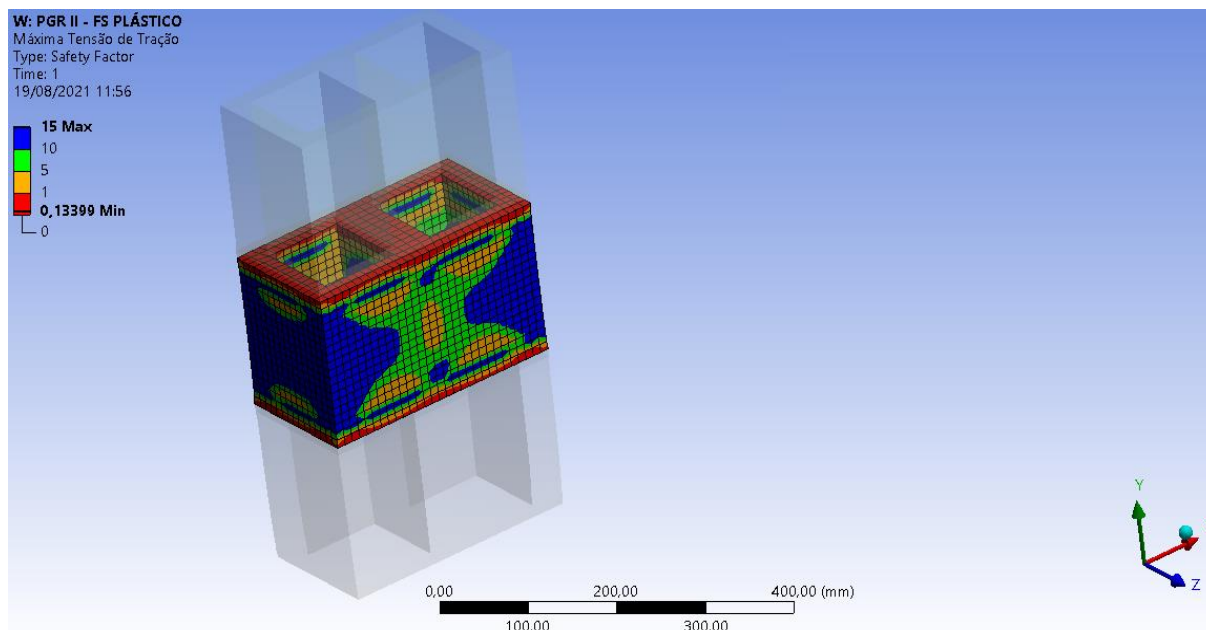
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.24 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGR I - FS PLÁSTICO



Fonte: Próprio Autor

Figura 6.25 - Gráficos dos critérios do fator de segurança para início de fissuração - PGR II - FS PLÁSTICO

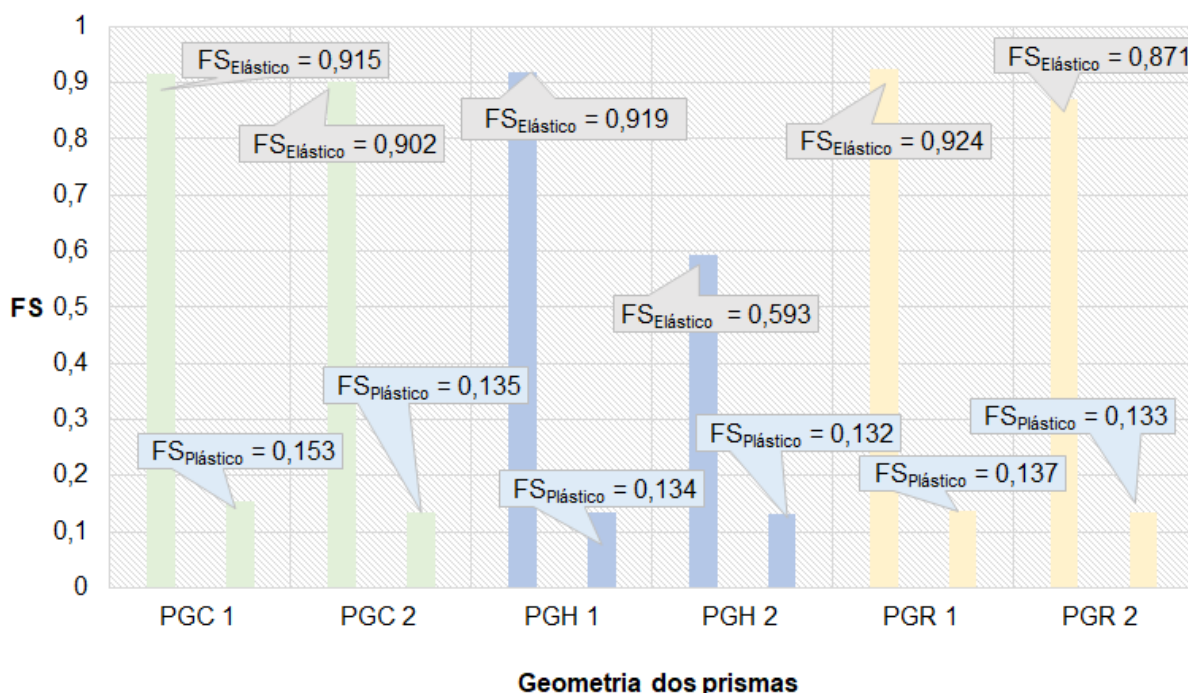


Fonte: Próprio Autor

6.4.1 Soluções numéricas para os fatores FS dos prismas de três blocos

A Figura 6.26 mostra os valores dos critérios de início de escoamento FS para cada geometria na fase elástica e plástica dos materiais. A presente figura expõe os FS dos prismas e em ambas as simulações, tanto na fase elástica quanto na fase plástica os prismas foram submetidos as mesmas condições de contorno, como engastamento na base inferior dos prismas, mesmo carregamento de 25 MPa e discretização de malha.

Figura 6.26 - Gráfico dos critérios para início de fissuração FS em prismas de três blocos dentro do regime elástico e plástico dos materiais.



Fonte: Próprio autor

Analisando a figura a cima observa-se que o prisma PGC1 apresentou o valor do FS igual a 0,915 na fase elástica e 0,153 na fase plástica, o prisma PGC2 apresentou o valor do FS igual a 0,902 na fase elástica e 0,135 na fase plástica, o prisma PGH1 apresentou o valor do FS igual a 0,919 na fase elástica e 0,134 na fase plástica, o prisma PGH2 apresentou o valor do FS igual a 0,593 na fase elástica e 0,132 na fase plástica, o prisma PGR1 apresentou o valor do FS igual a 0,924 na fase elástica e 0,137 na fase plástica e o prisma PGR2 apresentou o valor do FS igual a 0,871 na fase elástica e 0,133 na fase plástica das simulações.

E estes valores em todos os prismas se concentraram principalmente na interface do bloco com a argamassa conforme pode ser visto nas Figuras 6.14 a 6.25.

Os resultados da Figura 6.26 expõe que as simulações para o comportamento plástico dos materiais são mais conservadores, apresentando valores de FS muito menores que no comportamento linear.

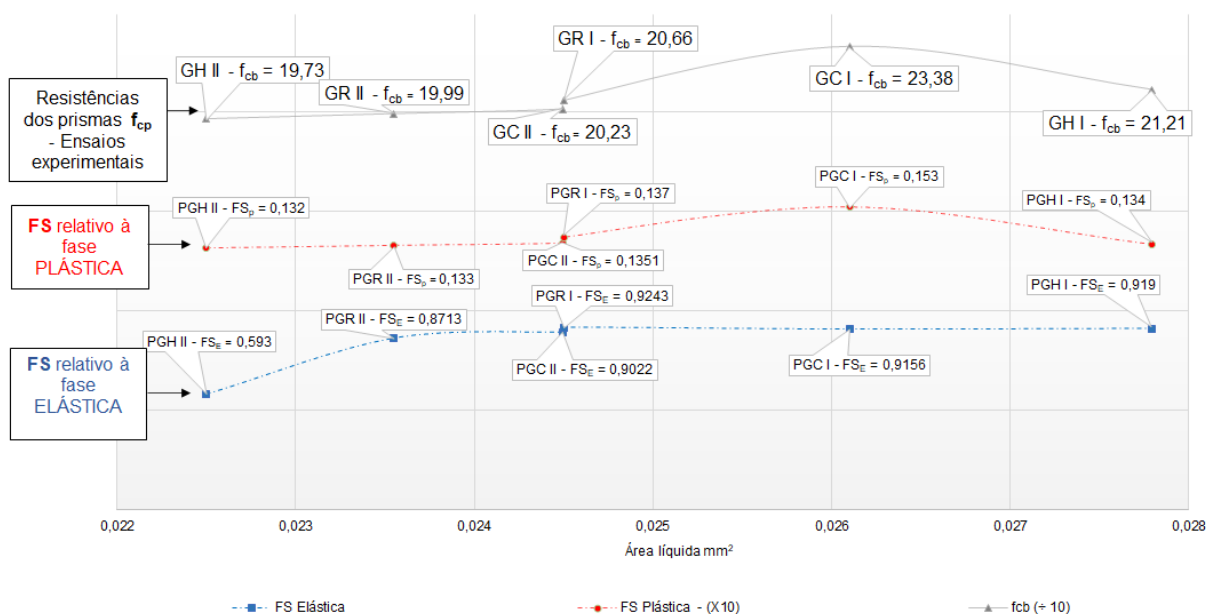
É importante enfatizar que o objetivo destas análises são de cunho acadêmico onde a intenção é encontrar diferentes valores para FS e compara-los, mesmo que de modo geral as condições impostas nas análises mostraram que tanto

para o comportamento elástico e plástico todos os blocos não apresentam condições estruturais para suportar a carga imposta a eles, ou seja, do ponto de vista estrutural todos os blocos se encontram fissurados e sem capacidade portante.

A Figura 6.27 mostra as relações para as comparações entre os critérios do início de fissuração dos prismas na fase elástica $FS_{Elástico}$ (FS_E), na fase plástica $FS_{Plástico}$ (FS_P), as resistências dos blocos f_{cp} , ensaiados experimentalmente, e as respectivas áreas líquidas de cada geometria.

Para condicionar uma melhor visualização gráfica os FS e as resistências dos blocos foram colocadas na mesma ordem decimal numérica. Os valores de $FS_{Plástico}$ foram multiplicados por 10 e as resistências dos blocos foram divididas por 10.

Figura 6.27 - Gráfico das curvas entre os critérios para início de fissuração $FS_{Elástico}$ (FS_E), $FS_{Plástico}$ (FS_P), o f_{cp} e suas respectivas áreas líquidas de cada geometria



Fonte: Próprio autor

A Figura 6.27 possibilita observar a condição de que, quando ocorre a variação da área líquida de uma geometria, sua resistência e seu FS devem variar de formas equivalentes. Verificando as três análises constatou-se que a simulação na fase plástica se equivale aos resultados experimentais, como exemplo os valores do prisma com geometria circular PGC I, que apresenta o maior $FS_{Plástico}$, assim como o o bloco BGC I, ensaiado experimentalmente, o qual apresenta maior resistência à ruptura. Já a simulação do FS_E , na fase elástica, expõe valores não

equivalentes, a qual apresenta o PGR I com maior FS_E dentre as geometrias analisadas.

A Figura 6.27 mostra que não existe uma relação direta entre área líquida e resistência dos blocos para as geometrias estudadas, onde pôde-se ver que a área líquida não foi o principal fator que influenciou a resistência dos prismas e o mesmo ocorreu no trabalho experimental de Bortoletto (2020), pois mesmo o PGC I, não sendo a maior área líquida, foi quem apresentou maior resistência.

6.5 Quantificação das correlações paramétricas

As correlações lineares observadas nesta pesquisa são as correlações entre os parâmetros, sendo os parâmetros a variação geométrica nos blocos BGC I, BGH I e BGR I e as tensões de compressão e tração geradas nesses blocos. Não é buscado nesta análise as resistências dos blocos, mas somente o grau de dependência entre os parâmetros descritos, obtidos a partir dos valores de R^2 conforme Equação 5.1. Os parâmetros de entrada e saídas são definidos e descritos conforme Item 5.5.2.

6.5.1 Correlações paramétricas dos blocos vazados de concreto

Para analisar as figuras da Figura C.3 a Figura C. 6 no Apêndice C, relativo as análises das geometrias BGH I e BGR I, é preciso considerar que para a variação nas geometrias BGH I e BGR I quando se considera uma variação de 0 a -5 mm no vazado, deve-se considerar um aumento na abertura do vazado, e não uma diminuição, sendo assim, quando se analisar os parâmetros para estas duas geometrias as análises devem ser consideradas da direita para a esquerda nos gráficos de correlações paramétricas.

Isso ocorre porque o software Ansys, na interface do Workbench não considera como parâmetro de entrada para as dimensões do vazado no bloco para BGH I e BGR I o valor da abertura como sendo o valor real em milímetros, mas sim considera um início numérico em módulo. Então quando se analisar a variação para estas geometrias a variação de 0 para -5 mm significa que o vazado está aumentando e não diminuindo, já para a geometria BGC I a variação se dá de 50

para 55 mm, que de fato significa que a abertura do vazado está aumentando, não necessitando de considerações.

As correlações entre as variações do vazado nos blocos e as tensões máximas nas direções X e Y e as tensões mínimas na direção Y é apresentada na Tabela 6.5 através dos valores de R2 para cada correlação.

Tabela 6.5 – Soluções paramétricas entre variações geométricas e Tensões principais no bloco

VARIAÇÃO GEOMÉTRICA	CORRELAÇÃO PARAMÉTRICA		
	VALORES DE R2		
	$\sigma_{\text{Max}} - X$	$\sigma_{\text{Max}} - Y$	$\sigma_{\text{Min}} - Y$
BGC I*	0,171	0,0054	0,021
BGH I**	0,008	0,012	0,019
BGR I***	0,29	0,72	0

Fonte: Próprio autor

* Diminuição da área líquida da geometria BGC I em 5 mm

** Diminuição da área líquida da geometria BGH I em 5 mm

*** Diminuição da área líquida da geometria BGR I em 5 mm

Com base no que foi apresentado na Tabela 6.5, considerando os valores de R2, é possível afirmar que a geometria do bloco BGC I tem uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco e a tensão de tração na direção X, uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco com a tensão de tração na direção Y e uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco com tensão de compressão na direção Y.

A geometria do bloco BGH I tem uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco e tensão de tração em X, uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco com a tensão de tração na direção Y e uma correlação fraca entre a variação geométrica no bloco com tensão de compressão na direção Y.

A geometria do bloco BGR I tem uma correlação moderada entre a variação geométrica no bloco e tensão de tração em X, uma correlação forte entre a variação geométrica no bloco com a tensão de tração na direção Y e uma correlação nula entre a variação geométrica no bloco com tensão de compressão na direção Y.

Constata-se que com os resultados da tabela 6.5 que, a partir do método matemático utilizando, Coeficiente de Pearson, a variação das dimensões de uma mesma geometria dos blocos influencia menos no desenvolvimento de tensões de tração e compressão no bloco do que a variação da forma geométrica.

7 CONCLUSÕES

Para um nível de solicitação de carga, em que os prismas não tenham iniciado a fissuração e trabalhe em regime linear, a pesquisa apresentou uma boa correlação entre os valores numéricos e os experimentais para a curva tensão vs deformação.

Com os resultados da presente pesquisa foi possível provar que com a modelagem utilizada, uma carga solicitante de 80 % da carga de ruptura e trabalhando dentro do regime linear do material, qualquer tipologia de elementos e configuração de malha gera praticamente os mesmos resultados de tensão deformação para as geometrias dos blocos estudados, ou seja, independente da tipologia de malha utilizada, dimensões e ordem dos elementos, os resultados obtidos foram praticamente iguais.

Conclui-se que as tensões, para as análises realizadas, ocorrem nos prismas de forma que o bloco sofre tensões de tração e a argamassa sofre tensões de compressão, sendo as maiores concentrações próximas a interface bloco-argamassa.

A partir dos resultados apresentados nos gráficos das tensões principais máximas, tensões de tração, em todas as geometrias analisadas, verificou-se que as concentrações destas tensões ocorrem com maior intensidade nas proximidades da interface bloco com a argamassa e segue o caminho em direção ao bloco, sendo que dependendo da geometria esse caminho pode ser em direção aos septos centrais ou laterais, mas sempre se desenhando nas paredes do vazado.

As disposições das tensões principais obtidas nas análises numéricas condizem com os ensaios experimentais, do estudo comparativo, e de outros da literatura, os quais apresentaram a forma de ruptura dos prismas de forma frágil com fissuras na posição vertical, com início próximo à região da argamassa e partindo em direção ao bloco, em decorrência do estado triaxial de tensões”.

Com base nas soluções obtidas nas análises dos critérios de início de fissuração FS foi possível considerar que as geometrias, as dimensões dos vazados e suas disposições influenciam nas concentrações de tensão no bloco. Com as soluções dos critérios FS foi possível verificar que os menores valores desse parâmetro ocorrem próximos as interfaces entre os blocos e argamassas.

Verificando a Figura 6.27, a partir das três análises ali exposta, verifica-se que as simulações dos FS_P , na fase plástica, se equivalem aos resultados experimentais, já as simulações dos FS_E , na fase elástica, expõe valores não equivalentes aos resultados experimentais, portanto conclui-se que a simulação considerando a plasticidade do material como sendo a mais próxima do real que as simulações na fase elástica.

A partir dos critérios FS constatou-se que a área líquida não é necessariamente o fator mais importante no comportamento dos blocos e prismas, pois blocos com maiores áreas líquidas necessariamente não apresentam maiores FS, como é o caso do bloco BGHI.

A partir dos resultados apresentadas nas análises numéricas das correlações paramétricas, considerando a variação geométrica nos blocos de concreto, foi possível afirmar que a relação entre os parâmetros geométricos e as tensões principais no bloco se comportam de formas diferentes, ou seja, dependendo da forma, tamanho e disposição dos vazados nos blocos essa relação pode apresentar magnitudes variadas, confirmando a influência existente entre a disposição e dimensão dos vazados no bloco de concreto na alvenaria estrutural.

Assim como nos ensaios experimentais, as simulações numéricas realizadas nesta pesquisa mostraram que, dentre as geometrias analisadas, a geometria circular, PGC I foi a que apresentou melhor desempenho, com maior resistência à ruptura e ao início de escoamento, constatando que geometrias sem cantos apresentam menores concentrações de tensões nos blocos.

Como conclusão é possível afirmar que o software comercial de análise por elementos finitos, Ansys 2020 R2, se mostrou viável para análise de tensões e início do fissuramento para os blocos estudados, visto que os resultados tiveram boa aproximação com os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

A Bíblia. **Bíblia de Estudo Palavras-chave Hebraico e Grego**. 4. ed. Rio de Janeiro; CPAD, 2015.

ABASI, A.; HASSANLI, R.; VINCENT, T.; MANALO, A. Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 264, p. 1-17, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120182.

ALBERTINI, M. M. **Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural utilizando o elemento finito prismático regular parabólico**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for compressive strength of masonry prisms**. ASTM C1314, West Conshohocken, 2018.

ANDOLFATO, R. P. **Estudo teórico e experimental da interação de paredes em edifícios de alvenaria estrutural**. 2006. 203 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16868-1:2020 Versão Corrigida: 2021**: Alvenaria estrutural: Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2021. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961 - 2**: Alvenaria estrutural: blocos de concreto Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011. 35 p.:2016 Versão Corrigida:2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASTM C 1006-84, **Standard test methods of splitting tensile strength of masonry units**, American Standard Test Method, Philadelphia, 1984.

AVELINO, A. F. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.

AZEVEDO, D. **Análise Estrutural com ANSYS Workbench: Static Structural**. 180 p. Mogi das Cruzes. 2016.

BORTOLETTO, M. **Estudo de geometrias de blocos vazados utilizando concreto autoadensável**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2020.

BORTOLETTO, M et al. Study of Alternative Geometry of Hollow Self-Compacting Concrete Masonry Blocks. **Journal of the International Masonry Society Masonry International**, Whyteleafe, v. 33. n. 2., p. 36 – 49, 2020.

BOULT, B.F. Concrete masonry prism testing. **Journal of the American Concrete Institute**. Farmington Hills, v.76, n.4, p.53-535, apr. 1979.

CAMACHO, J. S. **Alvenaria estrutural não armada**: parâmetros básicos a serem considerados no projeto dos elementos resistentes. 1986. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

CAPUZZO, V. **Estudo teórico e experimental da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas a ações verticais**. 2000. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2000.

CHEN, X.; LIU, Y. **Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench**. Boca Raton: CRC, 2015. 410 p.

COSTA, B. P.; MOHAMED, G.; BAVASTRI, E. Y. N.; VARGAS, A. S.; GARCEZ, M. R. Avaliação de desempenho de argamassa de assentamento modificadas polimericamente para alvenaria estrutural. **Ciência & Engenharia**, [s. l.], v. 24. n.1, p. 43, 2015.

D’Altri, A. M; Miranda, S; Castellazzi, G; Sarhosis, V. A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels. **Computers and Structures**, Oxford, v. 206, p.18–30, 2018.

FAGLIONI, A. F. **Análise não-linear de vigas de concreto utilizando elemento finito prismático regular linear associado ao de barra**. Ilha Solteira, FEIS-UNESP. 2006. 122 p.

FILHO, D. B. F; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 115, 2009.

GISBERT J.I; BRU, D; GONZALEZ, A; IVORRA, S. Masonry micromodels using high order 3D elements. In: International Conference on Building Pathology and Constructions Repair – CINPAR, 14., 2018, [s. l.]. **Proceedings [...]** [S. l.: s. n.], 2018. p. 428–435

GOMES, N. S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1974. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1974.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IZQUIERDO, O. S. **Influência do tipo de argamassamento e da utilização de peças de ajuste dimensional na resistência à compressão da alvenaria de blocos de concreto**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JUNIOR, A. F. G. Projeto, **Construção e Caracterização de um triciclo em liga de alumínio 6063-T5 com acionamento manual e motor elétrico sem escova para pessoas com paraplegia**. 2019. 127 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2019.

LEONEL, E. D. **Modelos Não Lineares do Método dos Elementos de Contorno para Análise de Problemas de Fratura e Aplicação de Modelos de Confiabilidade e Otimização em Estruturas Submetidas à Fadiga**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, 2009.

LOURENÇO, P B. **Computational strategies for masonry structures**. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 1996.

MARTINEZ, P. H. **Influência da geometria de blocos cerâmicos no comportamento de vigas paredes de alvenaria estrutural**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2009.

MATA, R. C. **Análise experimental e numérica do comportamento de junta em painéis de contraventamento de alvenaria estrutural**. 2011. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2011.

MENDES, R. J. K. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais**. 1998. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LOURENÇO, P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 134, p.489-496, mar. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112.

NASCIMENTO, M. R. **O uso de argamassa de assentamento como preenchimento de alvenaria estrutural cerâmica**. 2015. 265 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2015.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. São Carlos: Ed. EdUfscar, 2014.

PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. Santa Maria, 2007. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2007.

PEDREIRO, M. R. M. **Análise do comportamento experimental e numérico de prismas de alvenaria estrutural submetidos a ações verticais utilizando elementos finitos volumétricos**. 2009. 209 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2009.

PELETEIRO, S. C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**. 2002. 143 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2002.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: PINI, 2003.

RAMAMURTHY, K.; GANESAN, T. P. Efficient Hollow Block Geometries for Masonry Under Eccentric Compression Proceedings. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 4th., 1992, Madrasa. **Proceedings** [...] Madrasa: [s. n.], 1992.

RIZZATTI, E. I; ROMAN, H. R.II; MOHAMAD, G.III; NAKANISHI, E. Y. Análise do comportamento mecânico das alvenarias estruturais de blocos cerâmicos utilizando modelos físicos reduzidos – Efeito da geometria. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n.5, p. 702-736, 2012.

RIZZATTI, E. I; ROMAN, H. R.II; MOHAMAD, G.III; NAKANISHI, E. Y. Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 730- 746, 2011.

SANTOS, C. F. R.; ALVARENGA, R. C. S. S.; RIBEIRO, J. C. L.; CASTRO, L. O.; SILVA, R. M.; SANTOS, A. A. R.; NALON, G. H. Avaliação numérico-experimental de prismas de alvenaria estrutural pelo método dos elementos finitos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 407-508, 2017.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 41 f. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/biblioteca/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

SILVA, A. F. **Avaliação da resistência à compressão da alvenaria estrutural**. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2007.

SPOZITO, R. S. **Análise numérica da distribuição de forças verticais em paredes de alvenaria estrutural**. 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, Ilha Solteira, 2017.

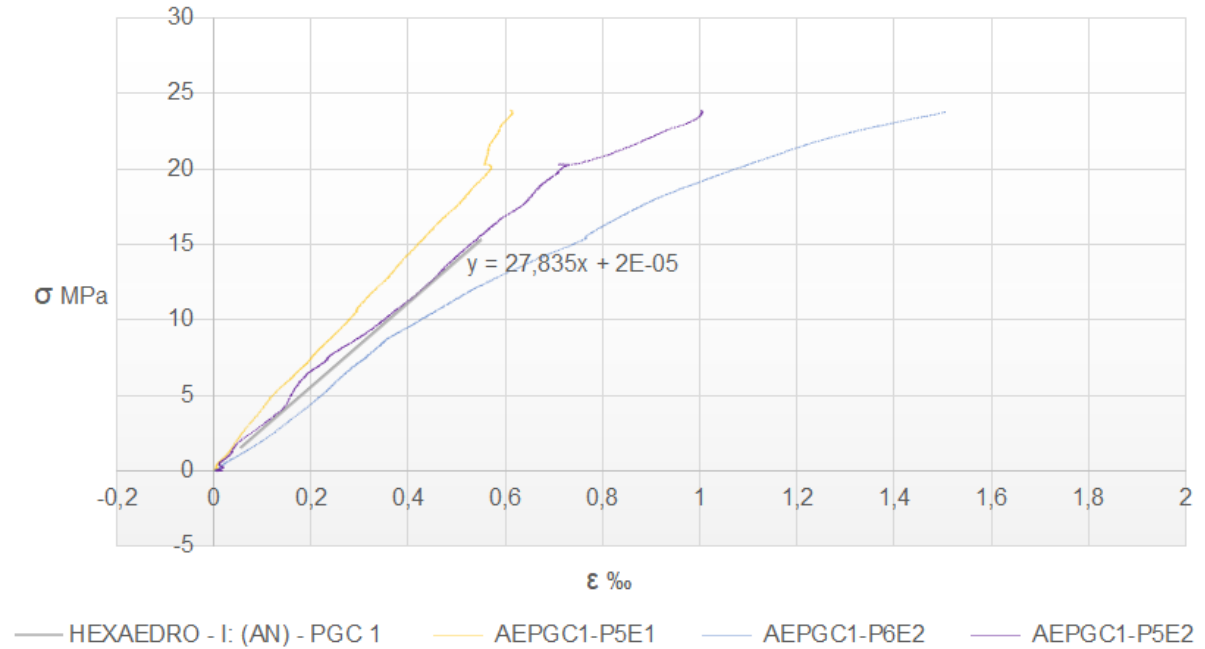
TAUIL, C. A.; FLÁVIO, J. M. **Alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2010.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos sólidos**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1983.

ZAHRA, T.; DHANASEKAR, M. Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 109, p.128-138, abr. 2016.

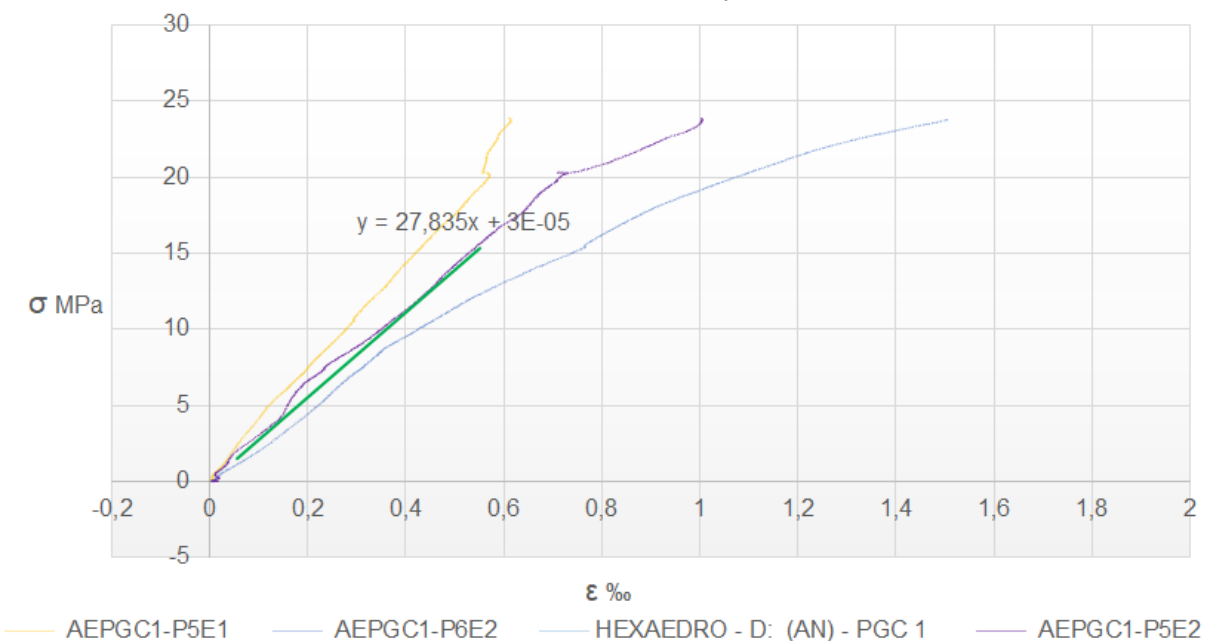
APÊNDICE A – GRÁFICOS DA CURVA TENSÃO VS DEFORMAÇÃO DAS ANÁLISES NUMÉRICAS X ANÁLISES EXPERIMENTAIS COM TODAS AS CONFIGURAÇÕES DE MALHA PARA COMPORTAMENTO ELÁSTICO DOS MATERIAIS

Figura A.1 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1: Malha Hexaédrica Linear Independente



Fonte: Próprio autor

Figura A.2 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1: Malha Hexaedra Linear Dependente



Fonte: Próprio autor

Figura A.3 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 1: Malha Tetraédrica Quadrática

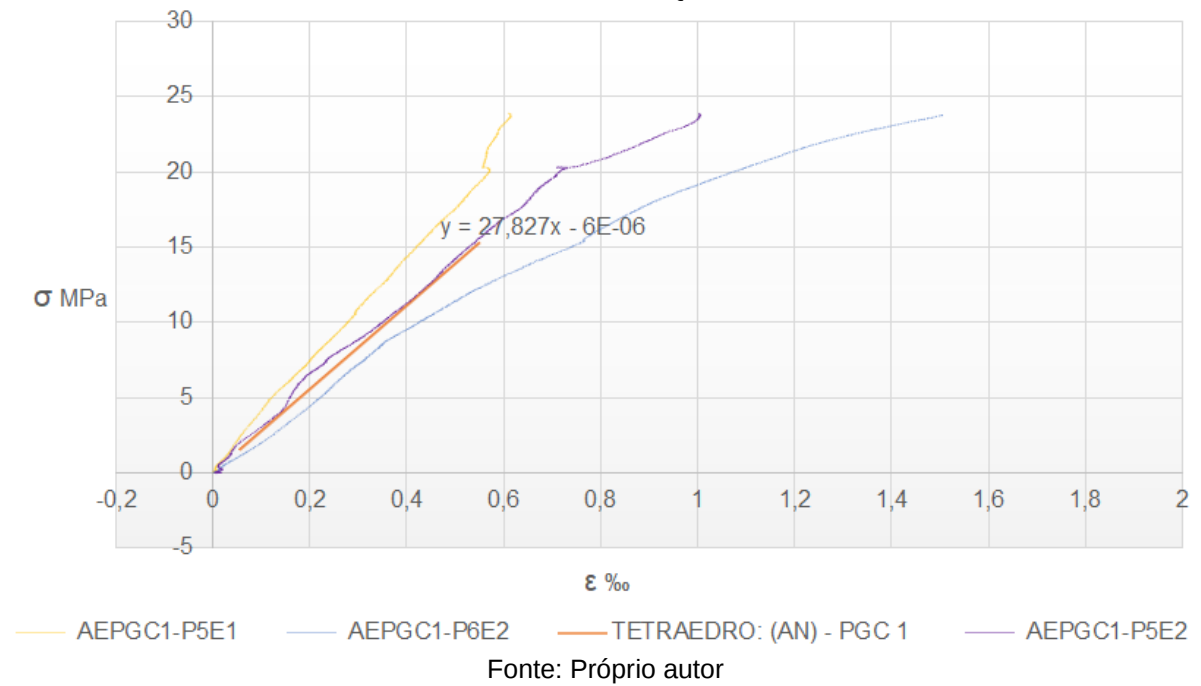


Figura A.4 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 2: Malha Hexaédrica Linear Independente

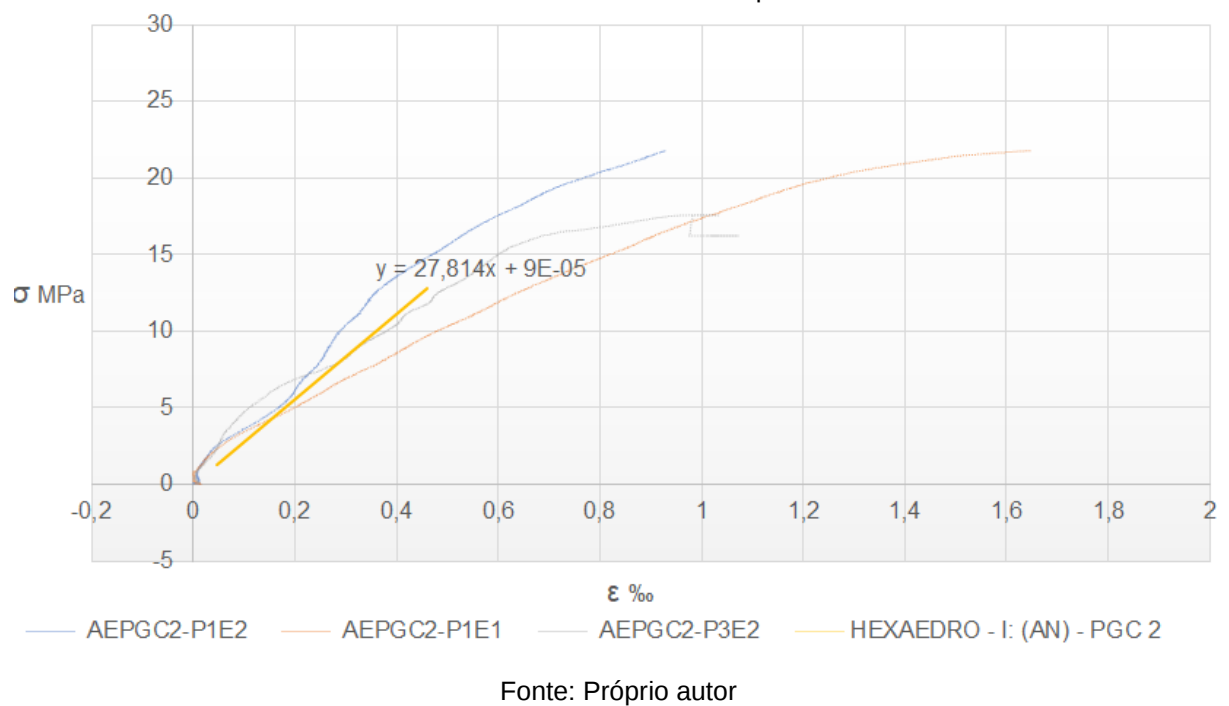
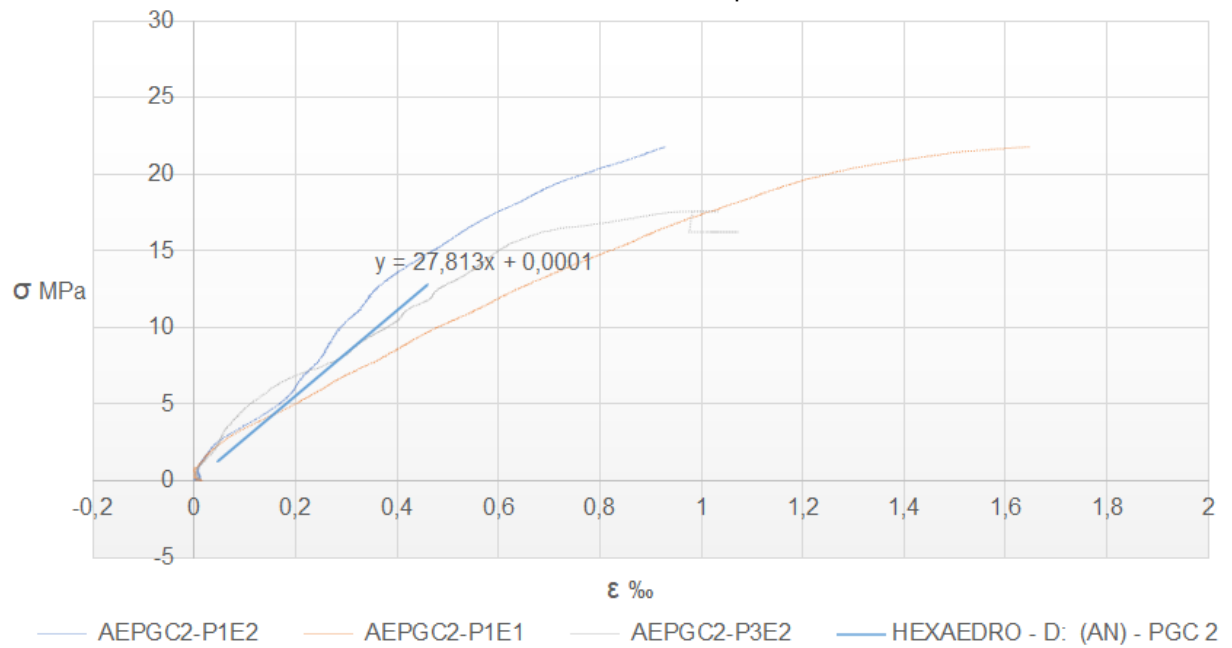
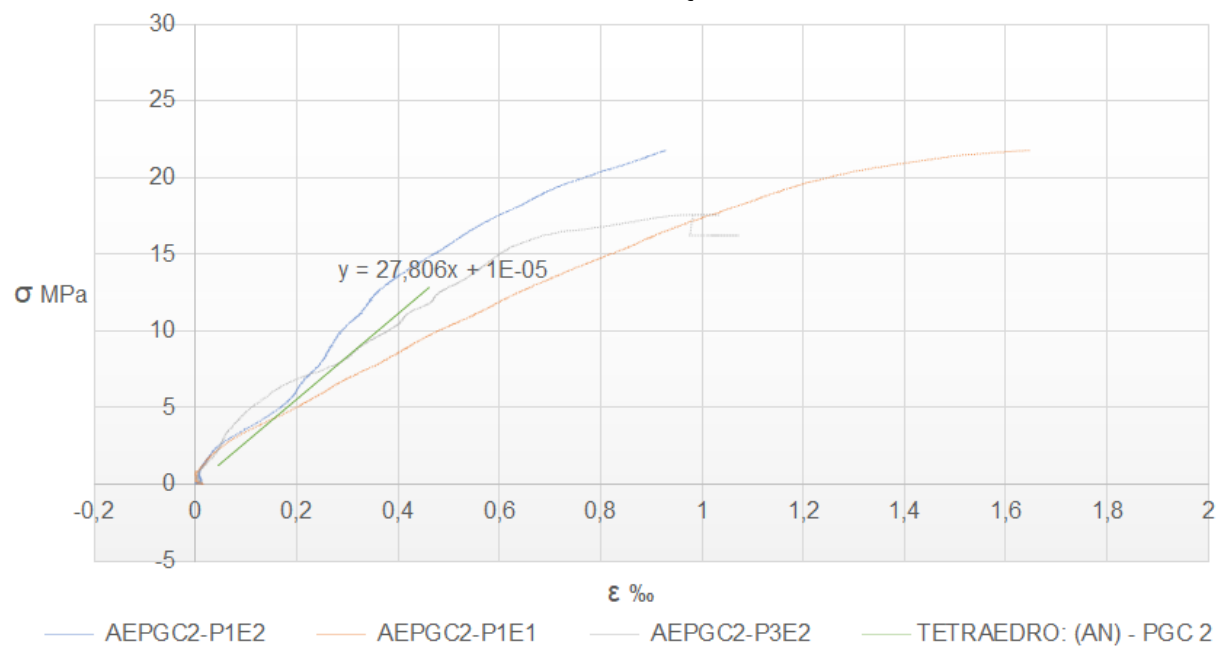


Figura A.5 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 2: Malha Hexaedra Linear Dependente



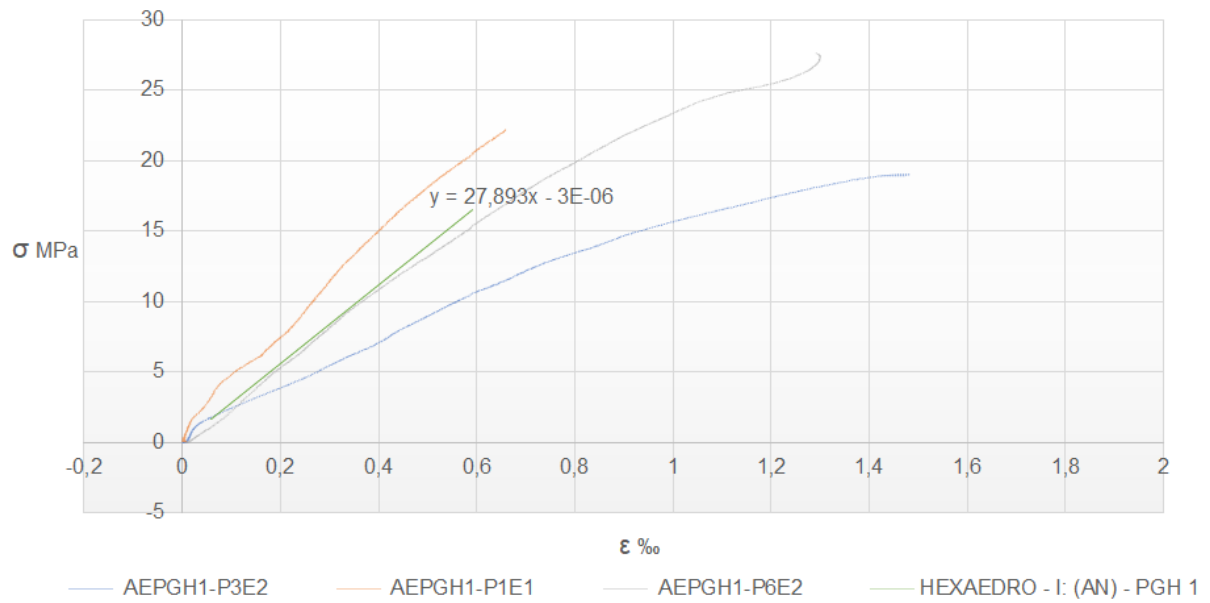
Fonte: Próprio autor

Figura A.6 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGC 2: Malha Tetraédrica Quadrática



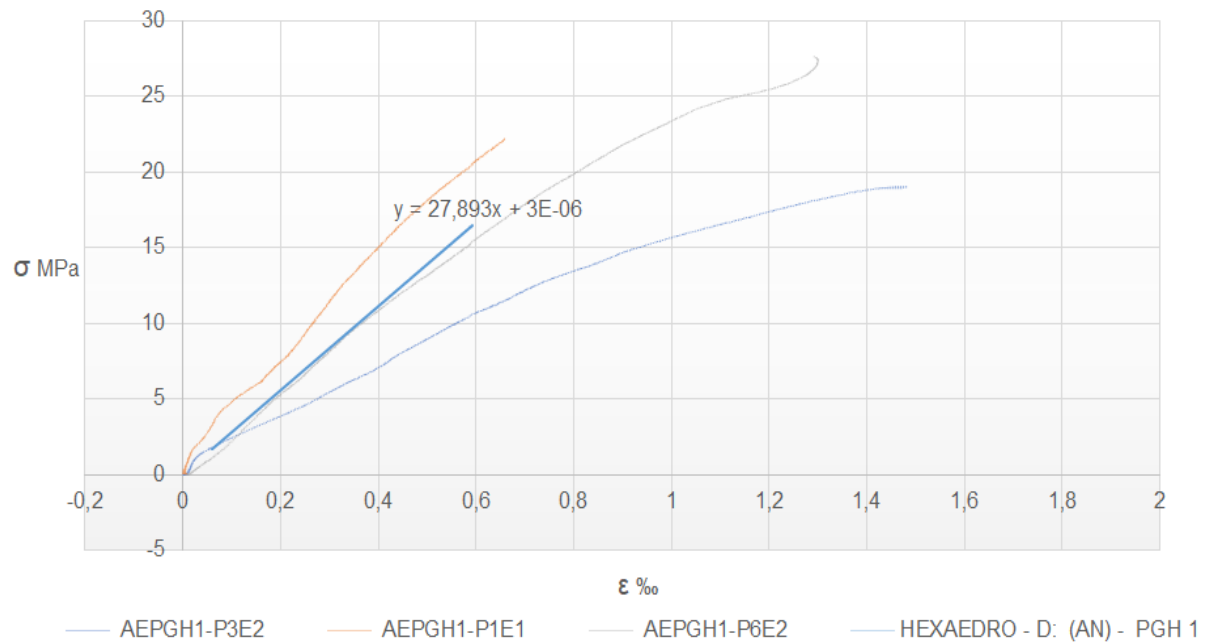
Fonte: Próprio autor

Figura A.7 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 1: Malha Hexaédrica Linear Independente



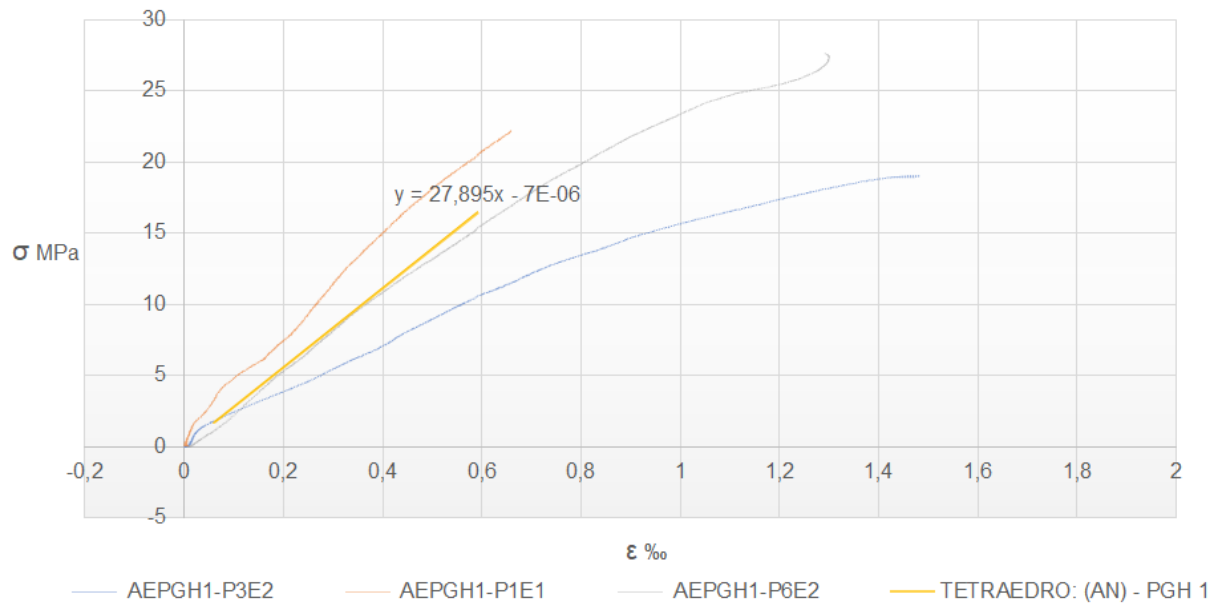
Fonte: Próprio autor

Figura A.8 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 1: Malha Hexaedra Linear Dependente



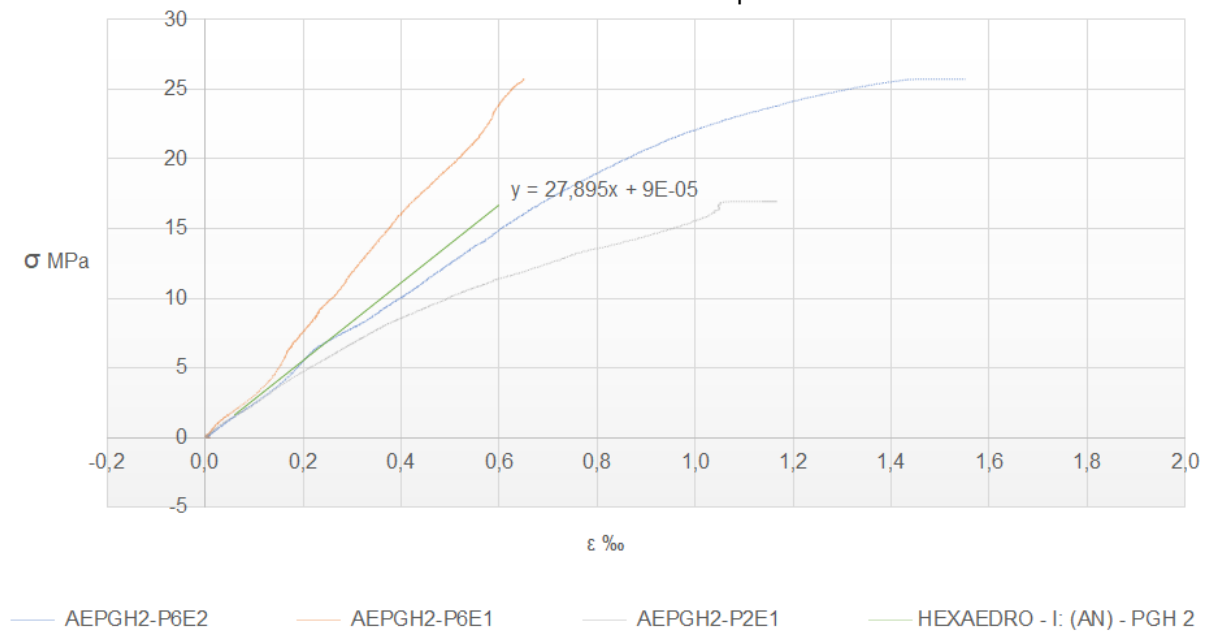
Fonte: Próprio autor

Figura A.9 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 1: Malha Tetraédrica Quadrática



Fonte: Próprio autor

Figura A.10 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 2: Malha Hexaédrica Linear Independente



Fonte: Próprio autor

Figura A.11 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 2: Malha Hexaedra Linear Dependente

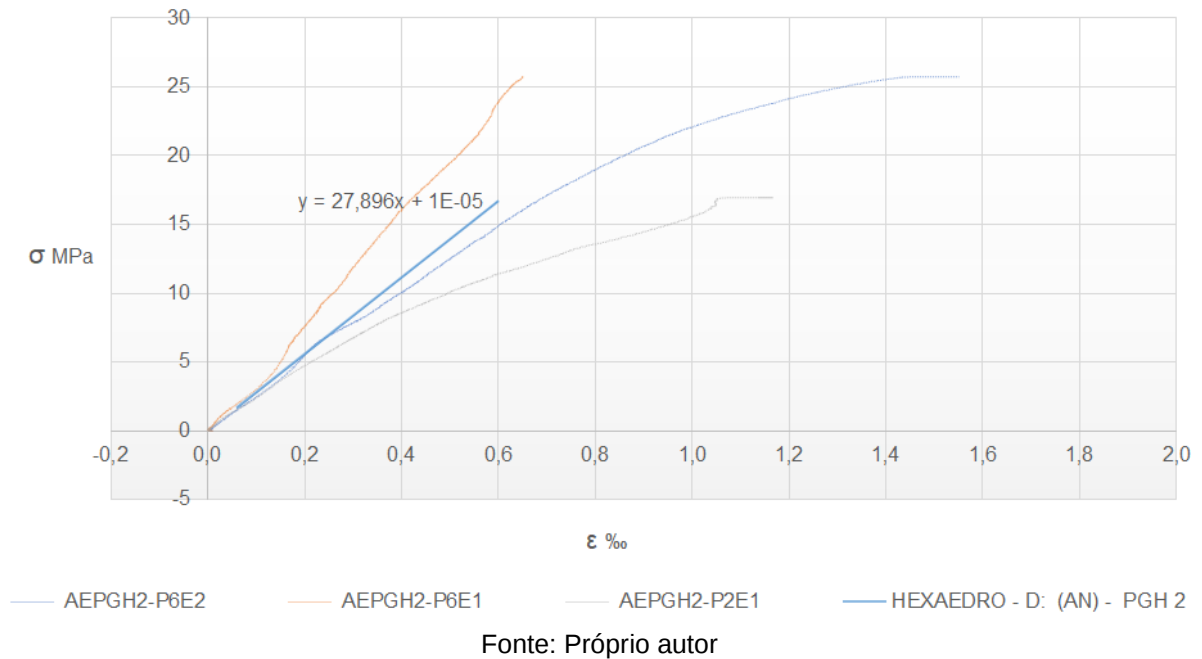


Figura A.12 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGH 2: Malha Tetraédrica Quadrática

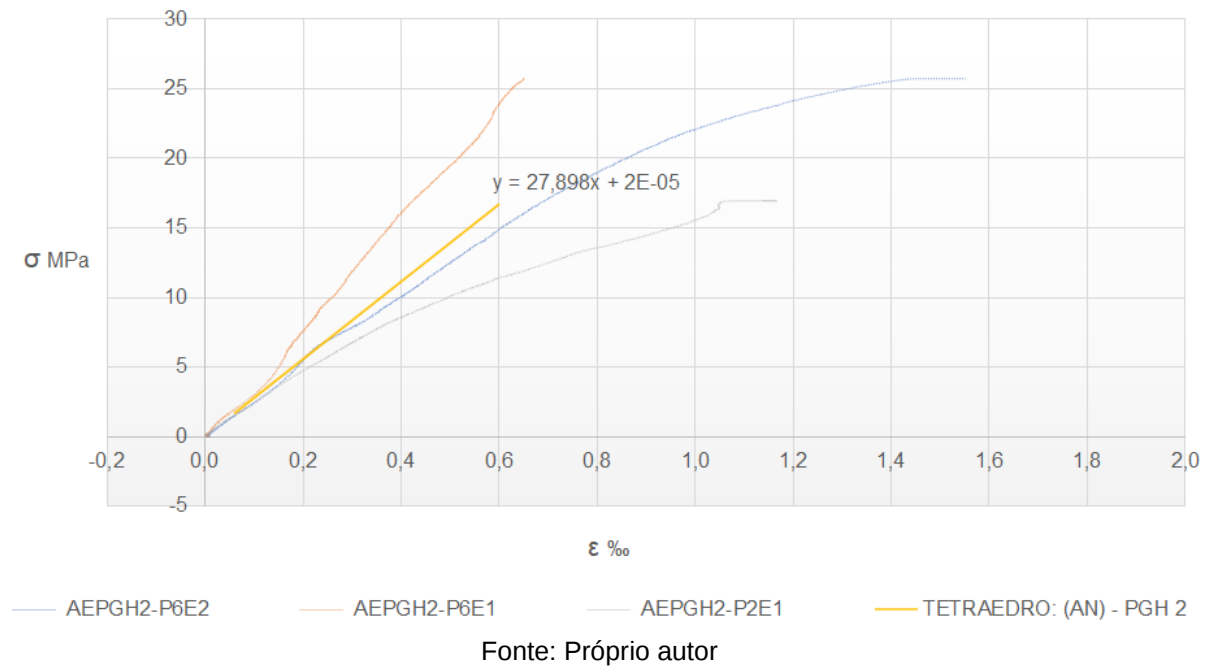
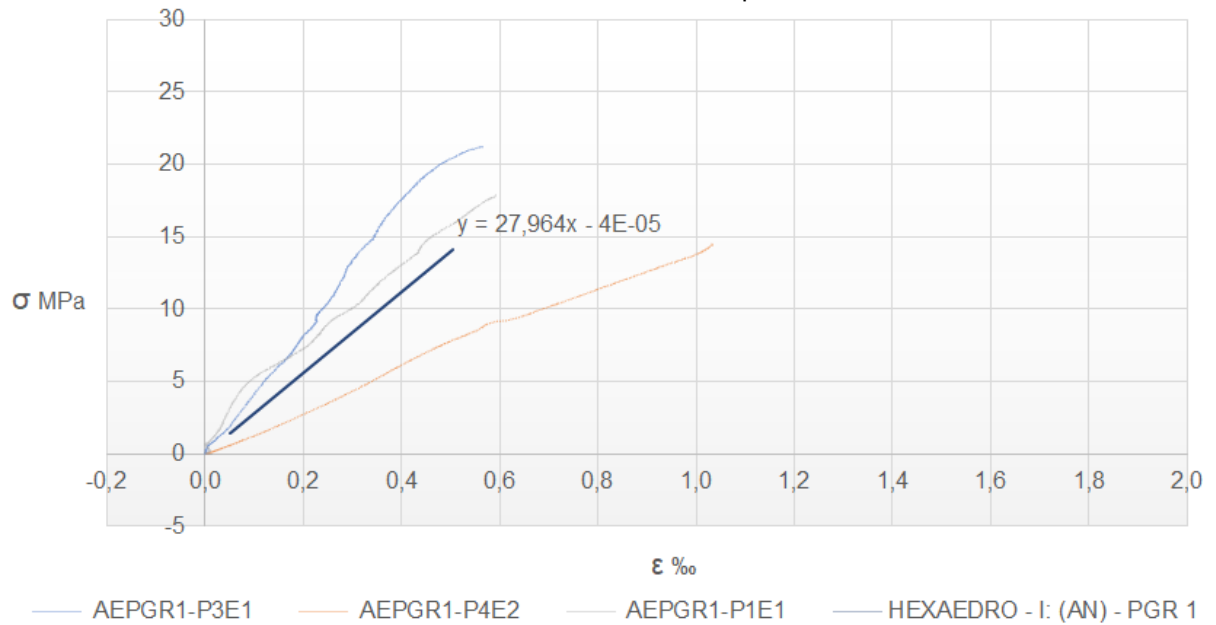
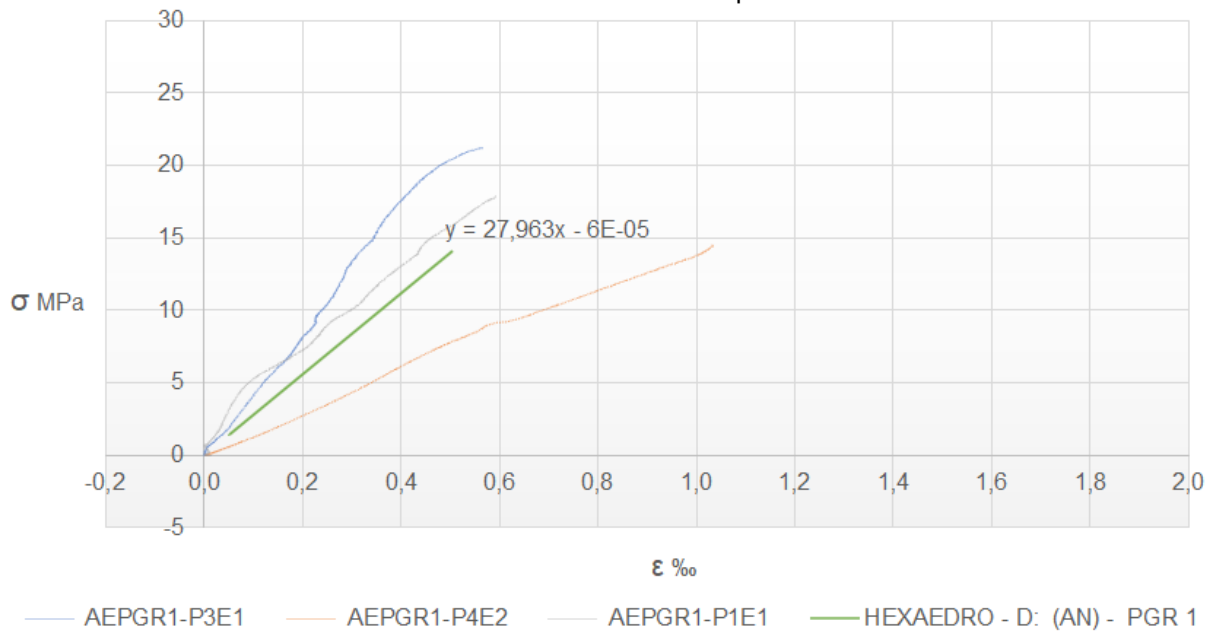


Figura A.13 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 1: Malha Hexaédrica Linear Independente



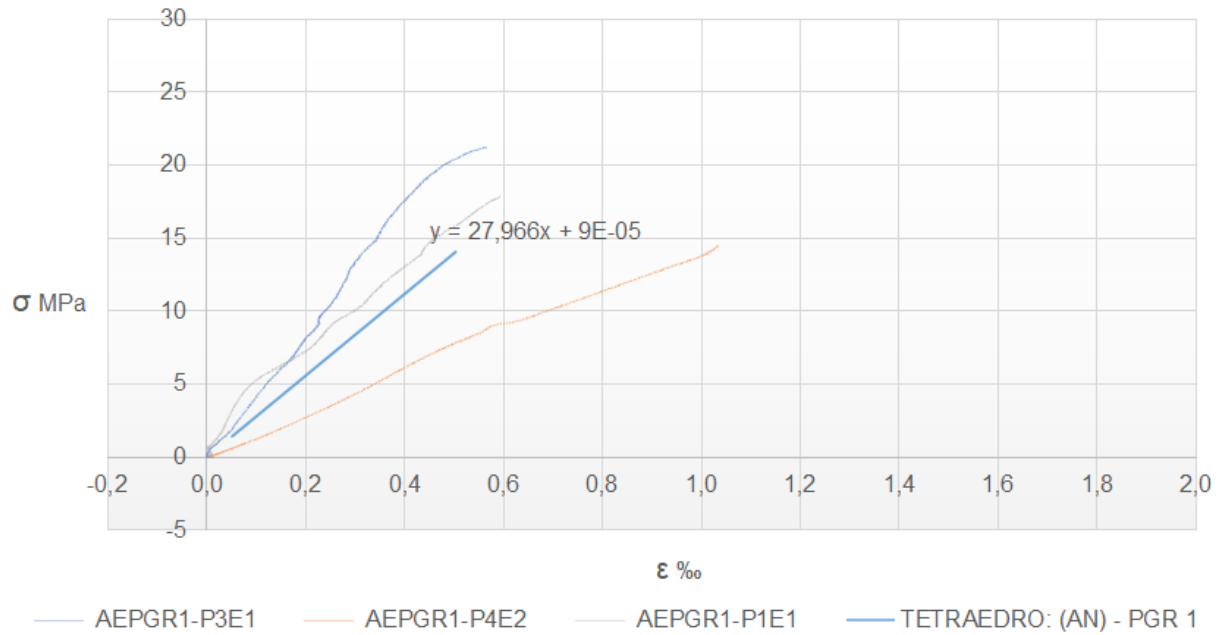
Fonte: Próprio autor

Figura A.14 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 1: Malha Hexaédrica Linear Dependente



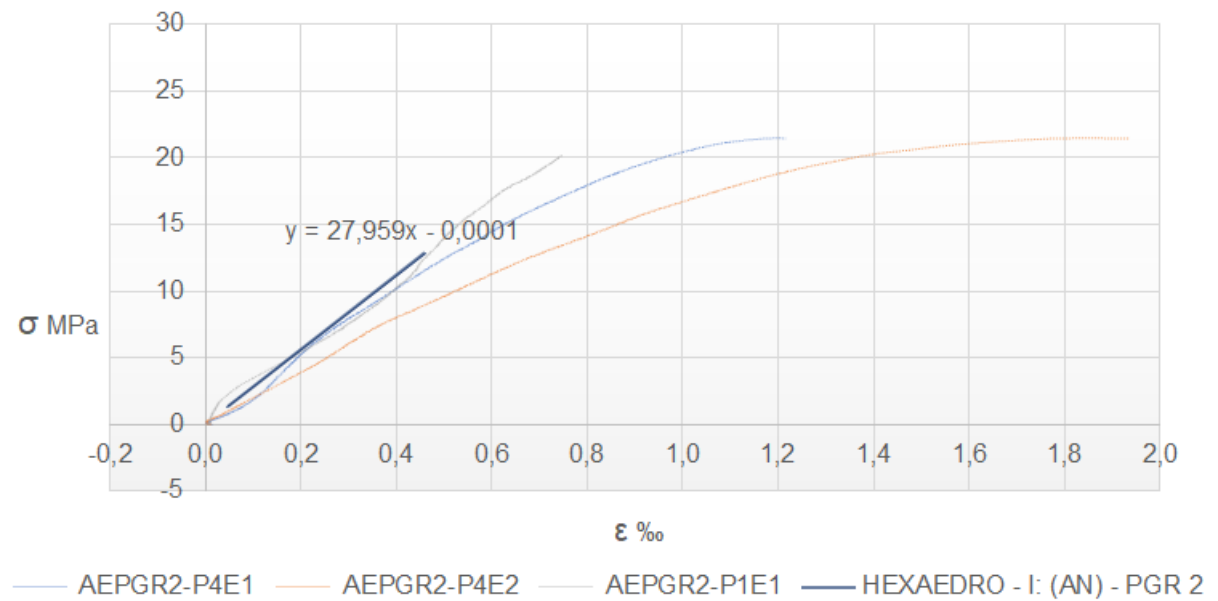
Fonte: Próprio autor

Figura A.15 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 1: Malha Tetraédrica Quadrática



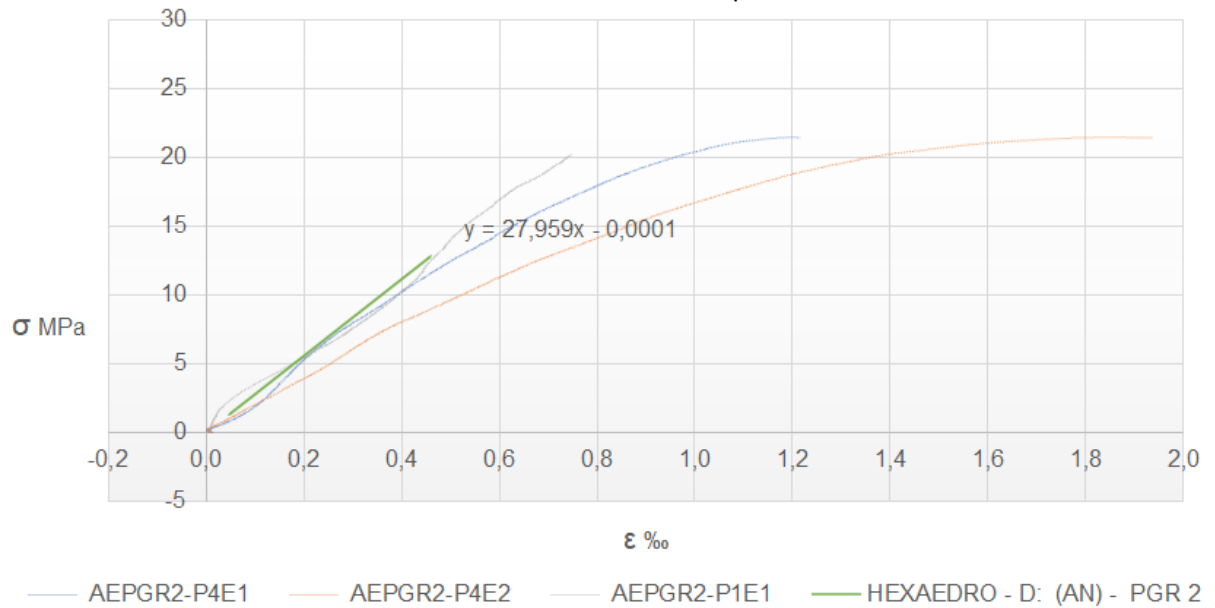
Fonte: Próprio autor

Figura A.16 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 2: Malha Hexaédrica Linear Independente



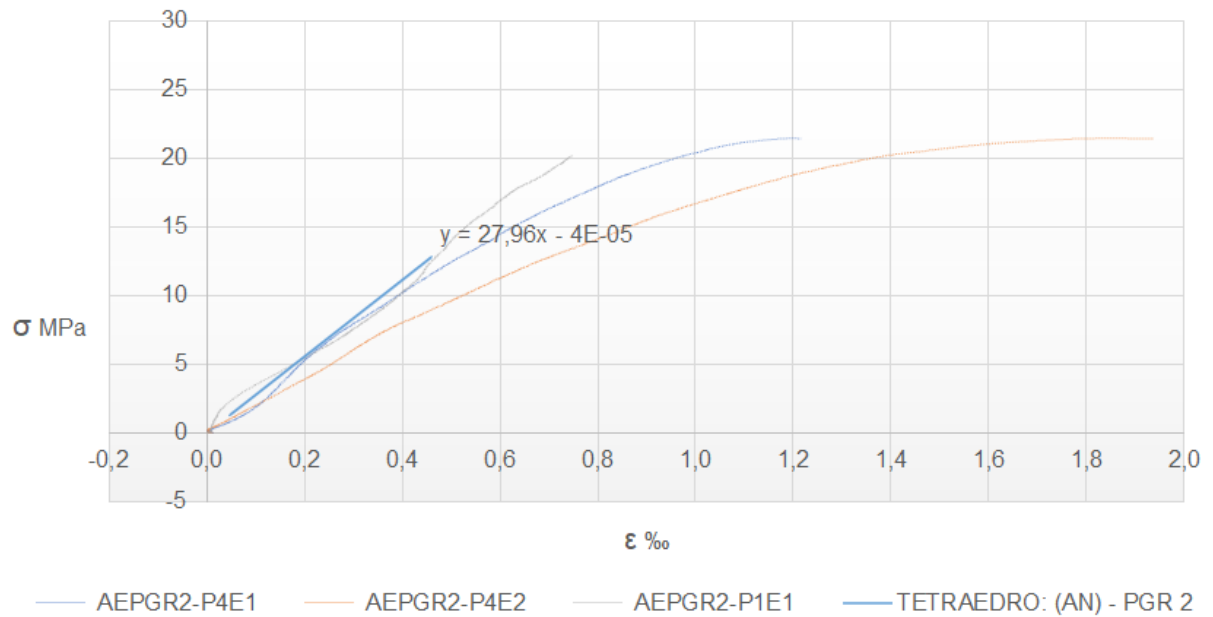
Fonte: Próprio autor

Figura A.17 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 2: Malha Hexaédrica Linear Dependente



Fonte: Próprio autor

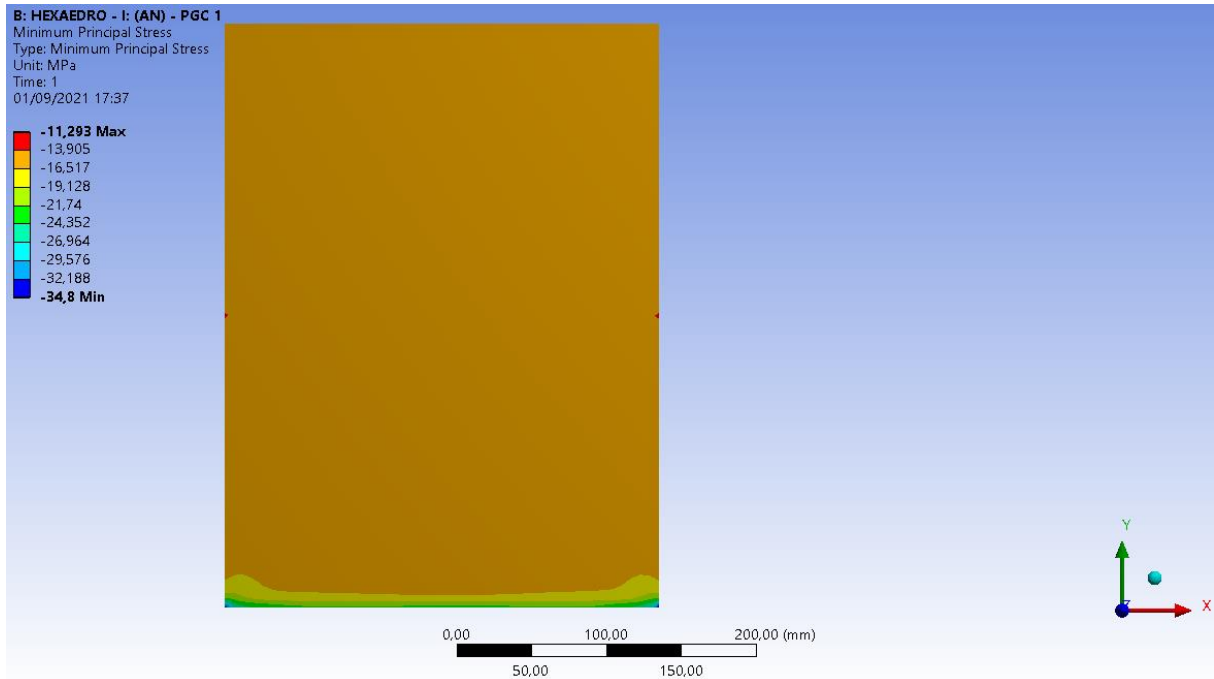
Figura A.18 - Gráfico da curva tensão vs deformação entre ensaio experimental x numérico para PGR 2: Malha Tetraédrica Quadrática



Fonte: Próprio autor

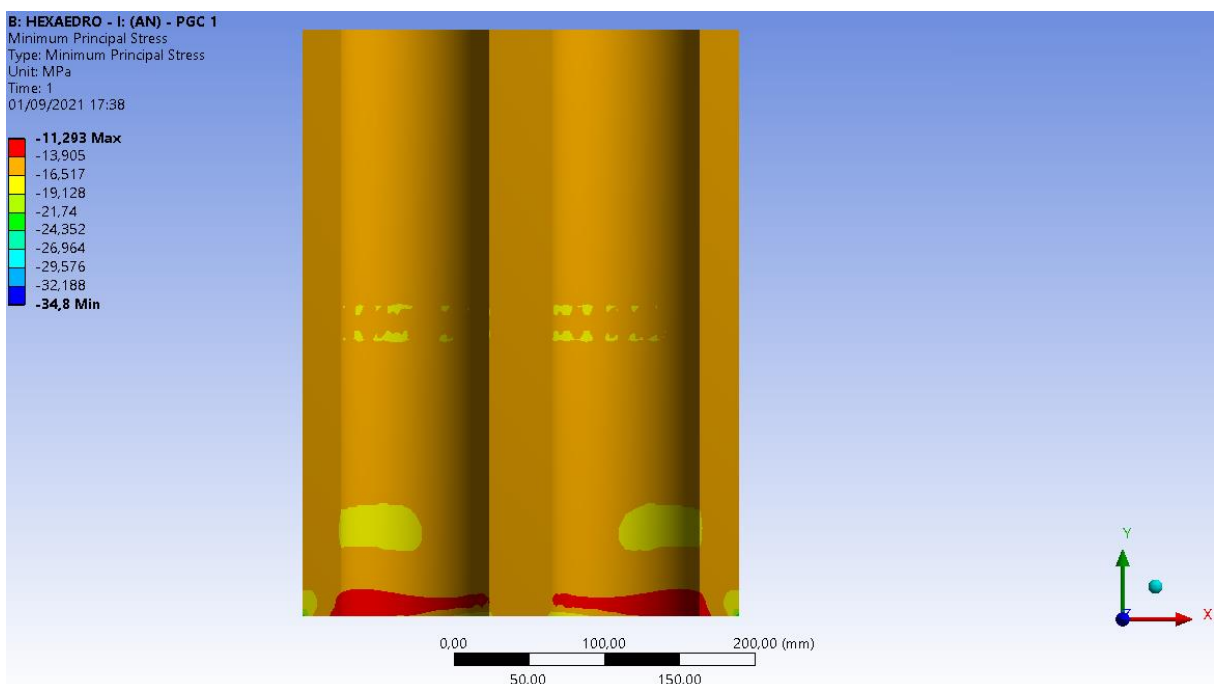
APÊNDICE B – GRÁFICOS COM TODAS AS CONFIGURAÇÕES DE MALHA TETRAÉDRICAS E HEXAÉDRICAS

Figura B.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra
Linear Independente para geometria PGC 1



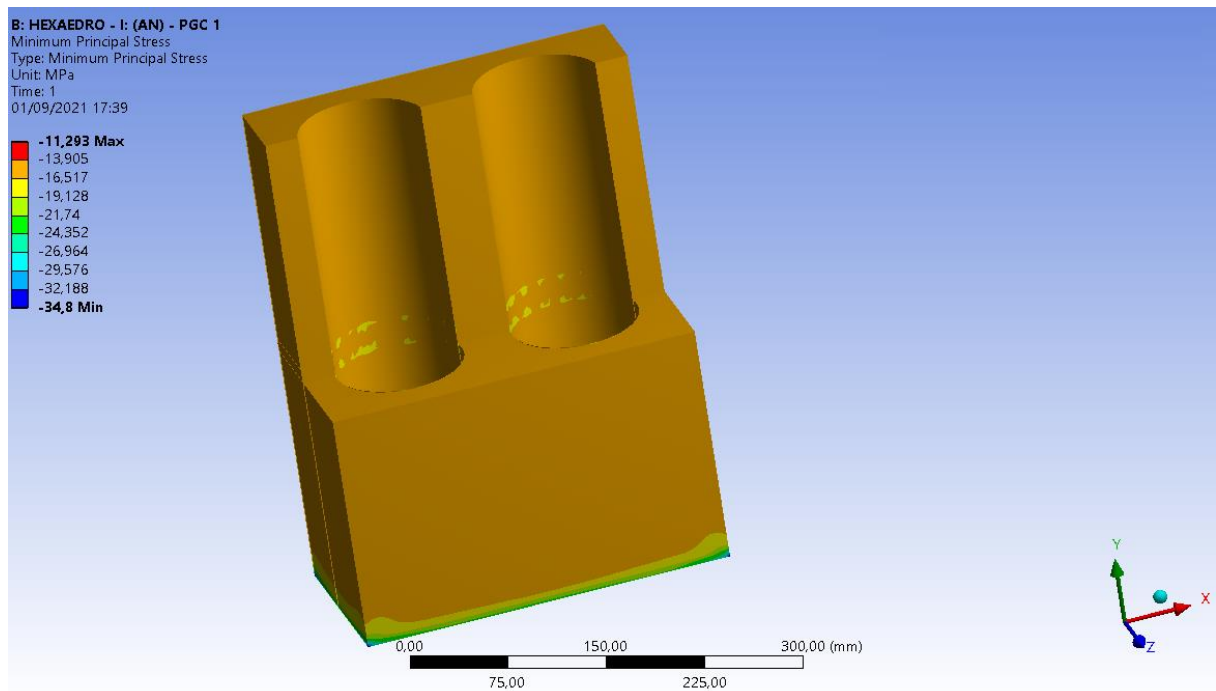
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra
Linear Independente para geometria PGC 1



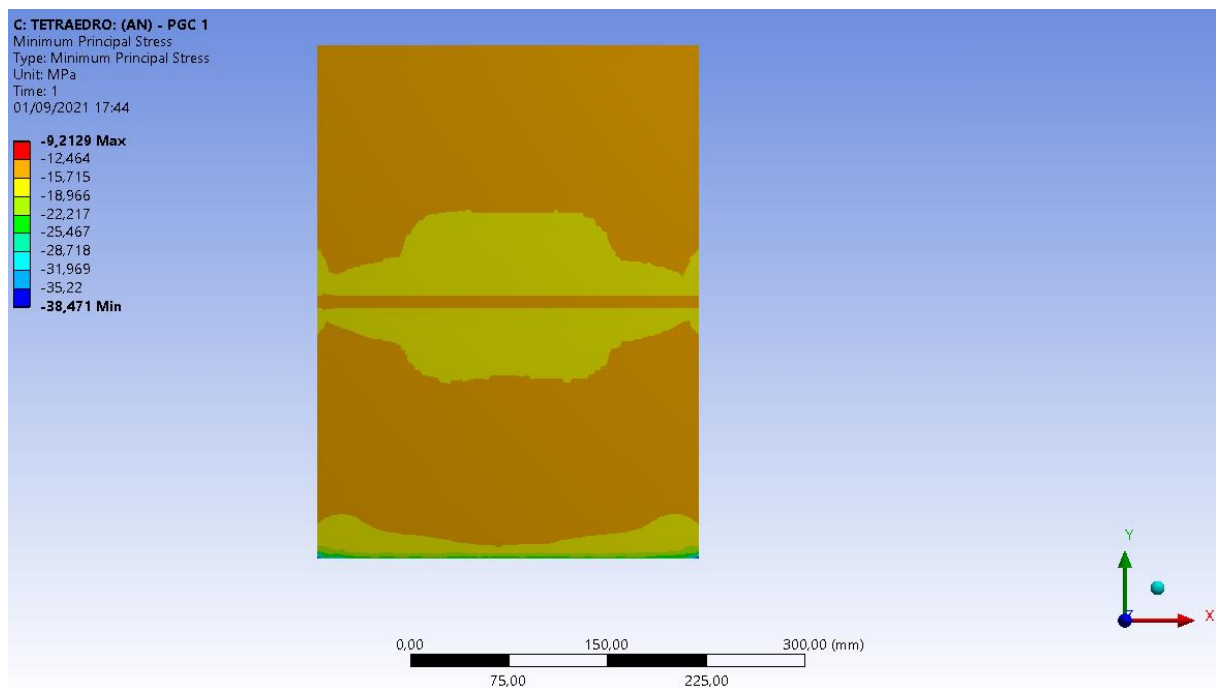
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 1



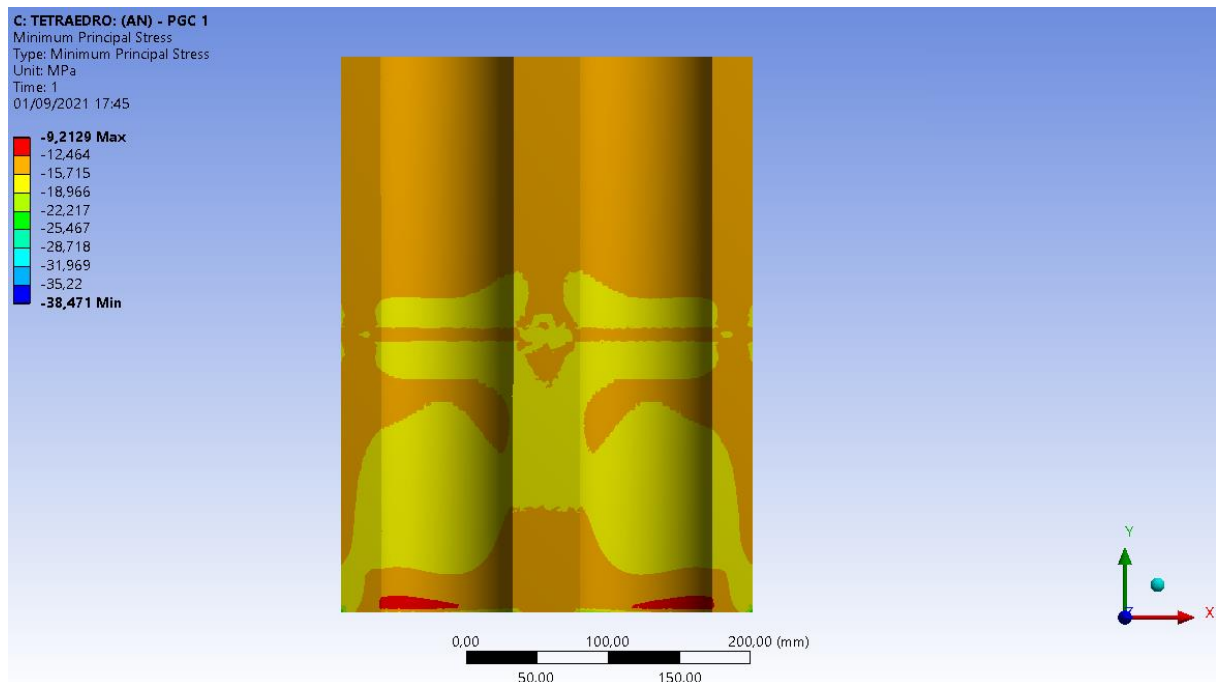
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



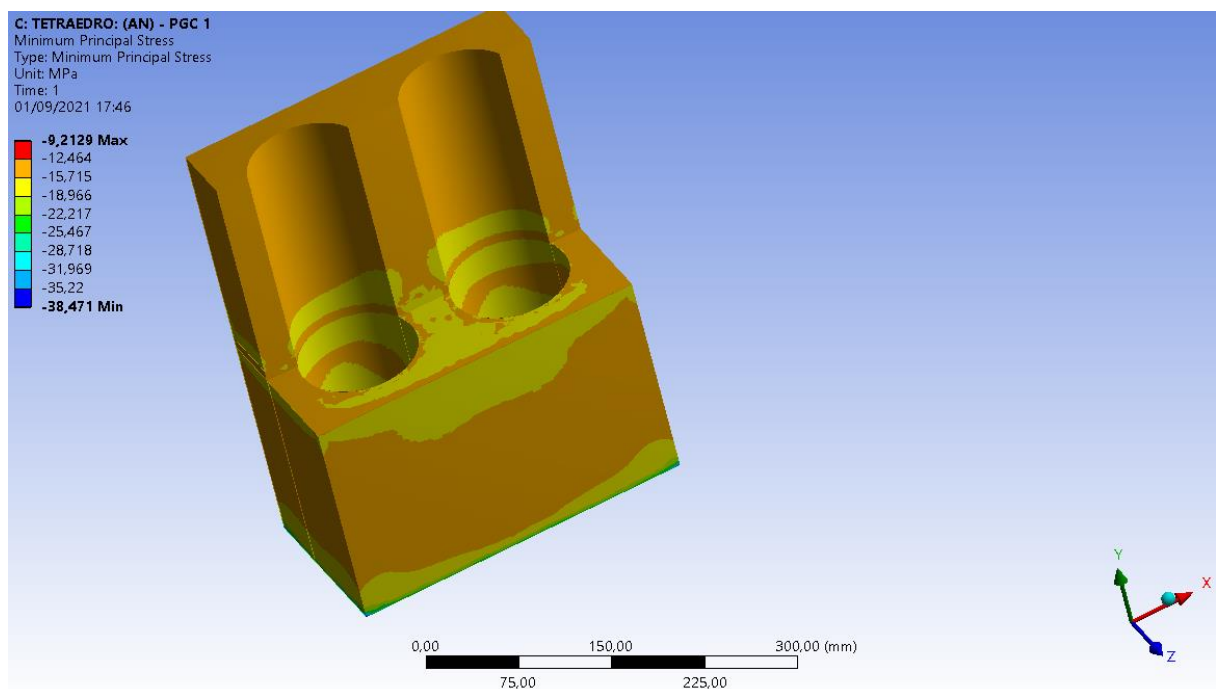
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



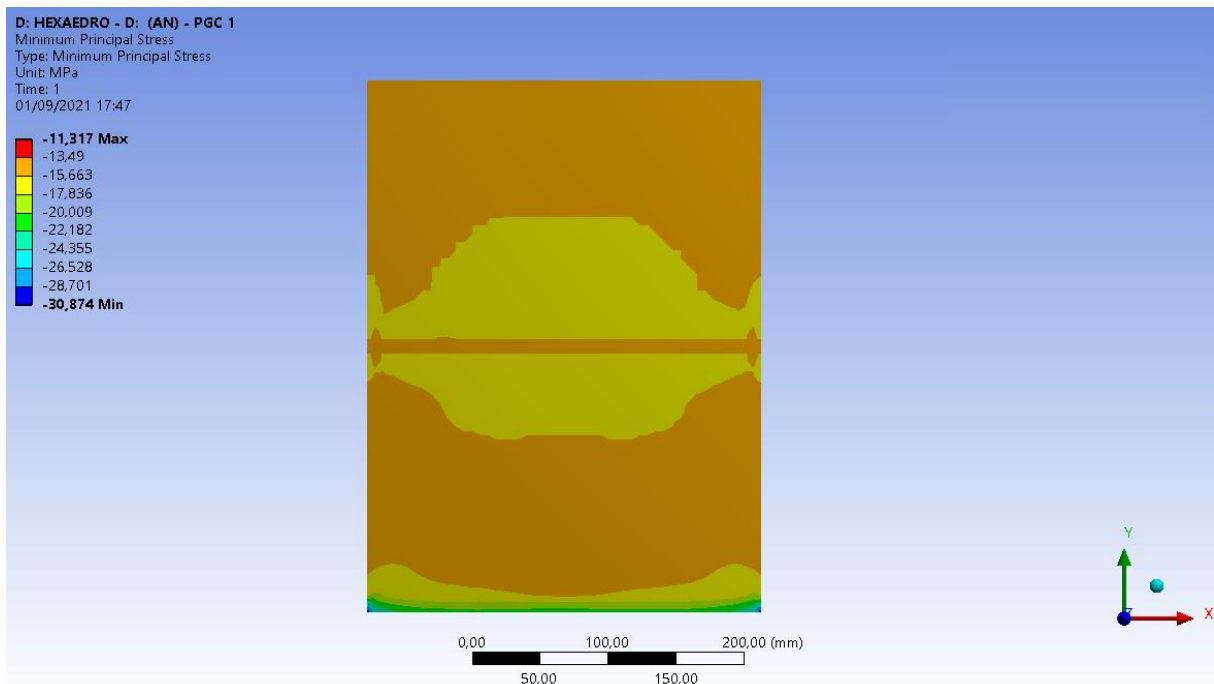
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



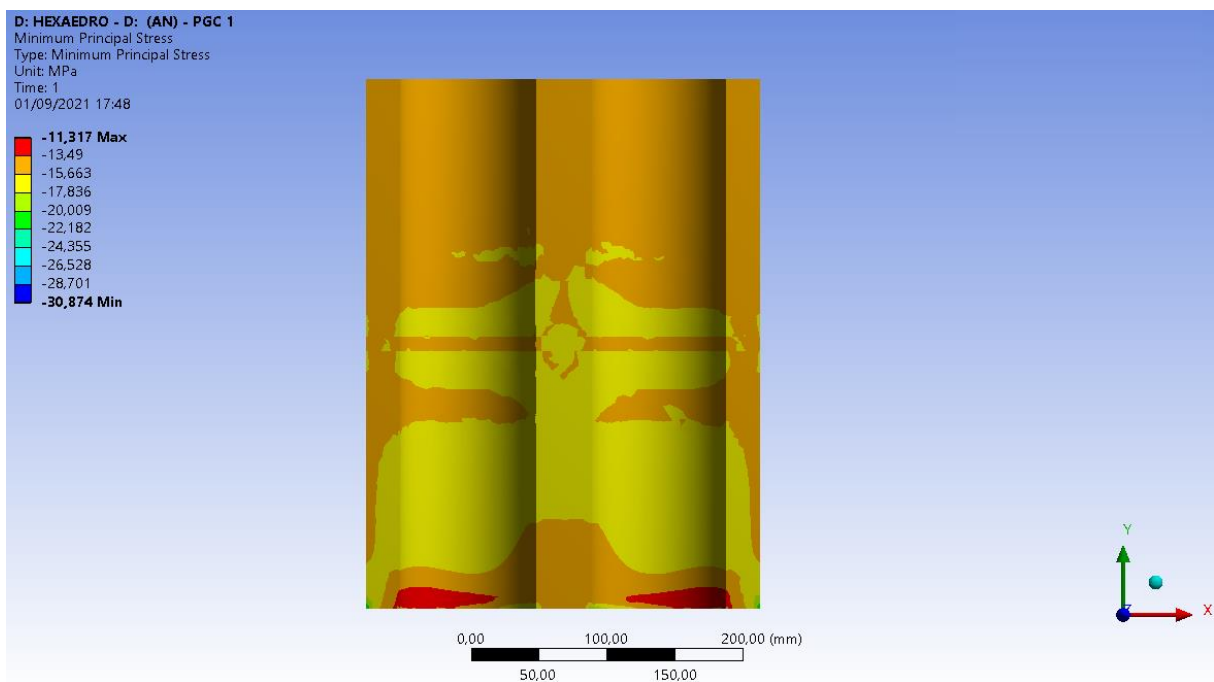
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



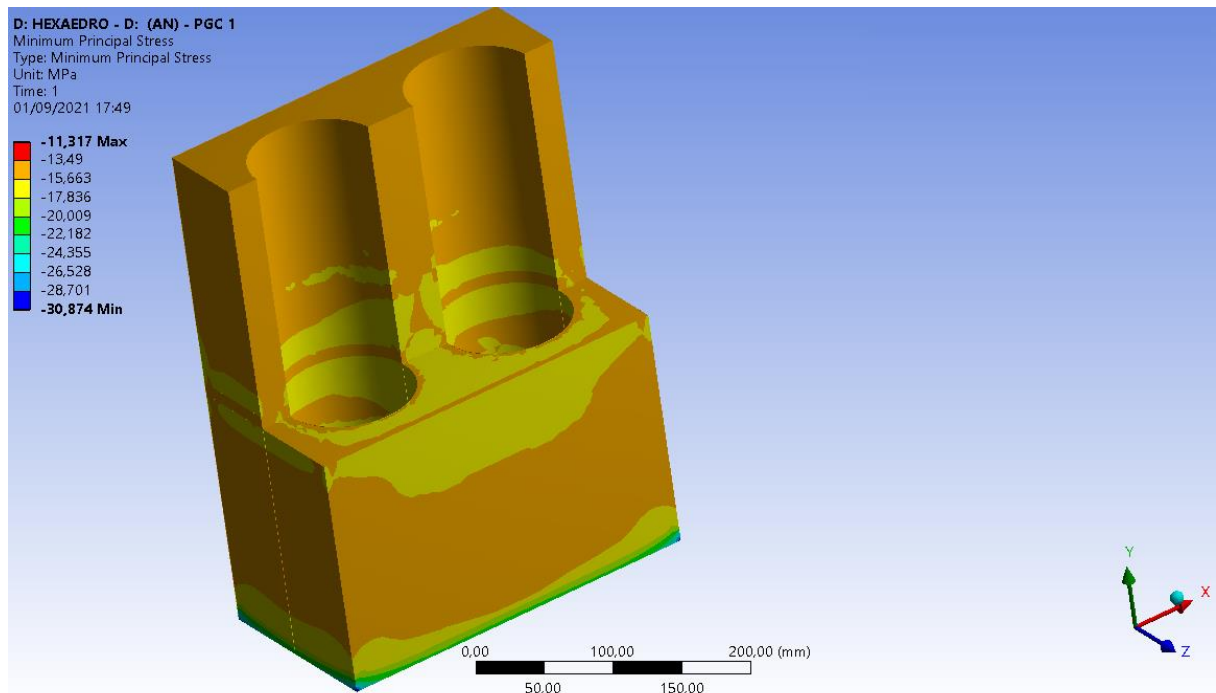
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



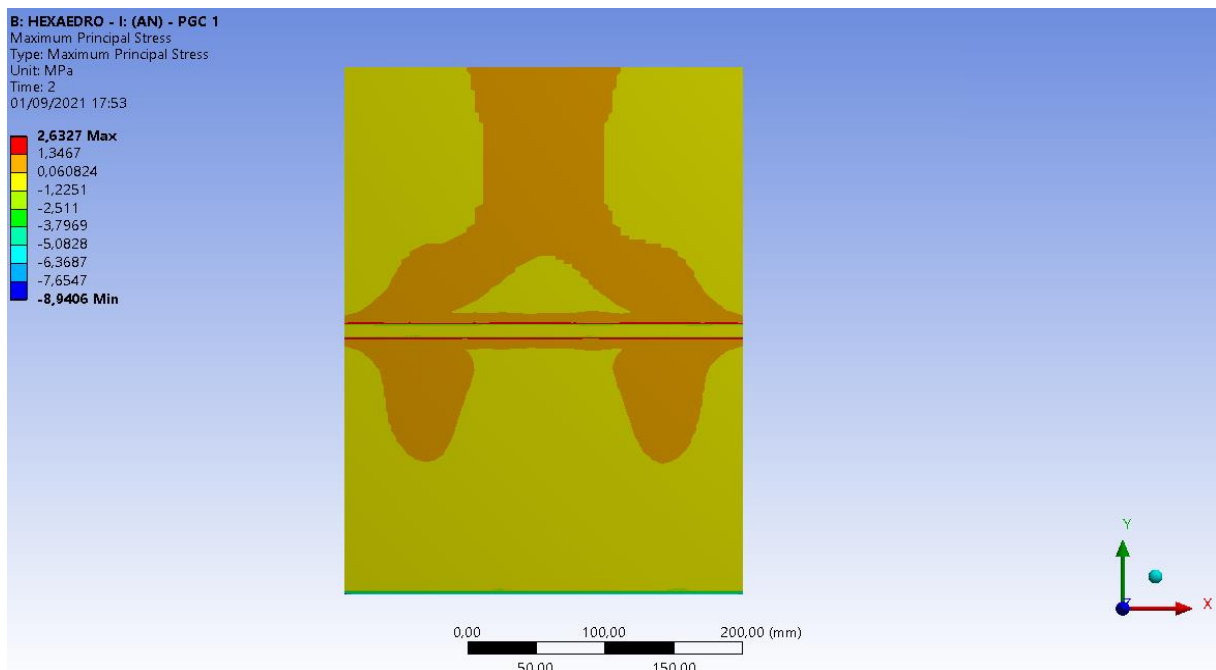
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



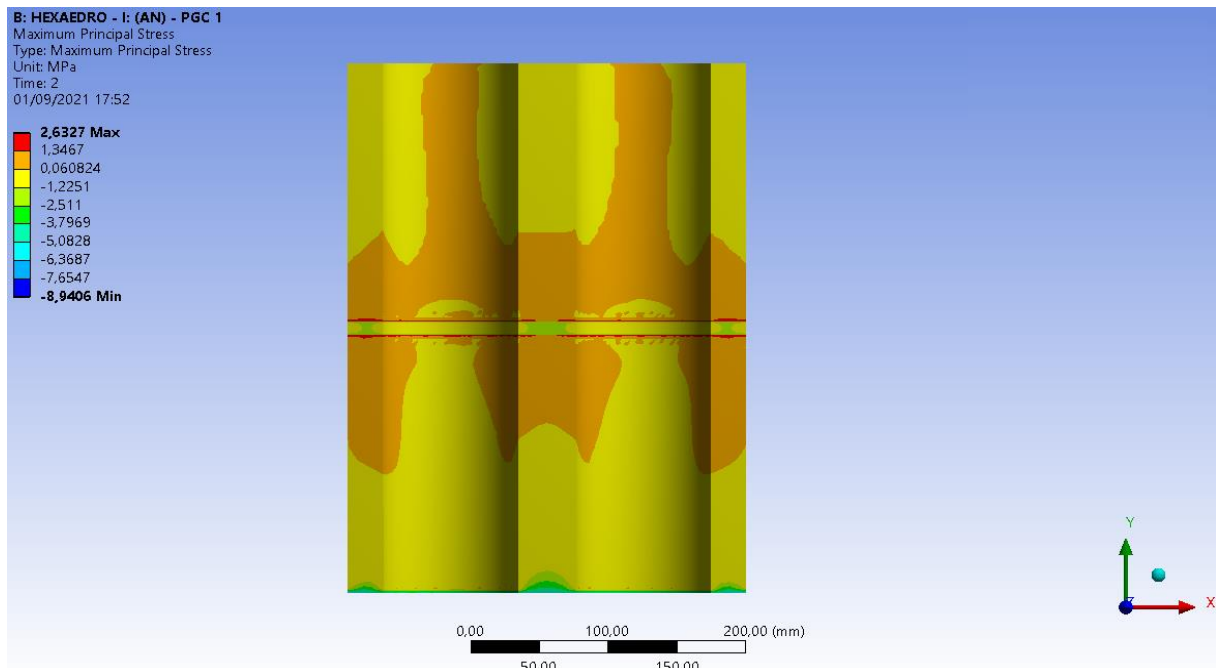
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 1



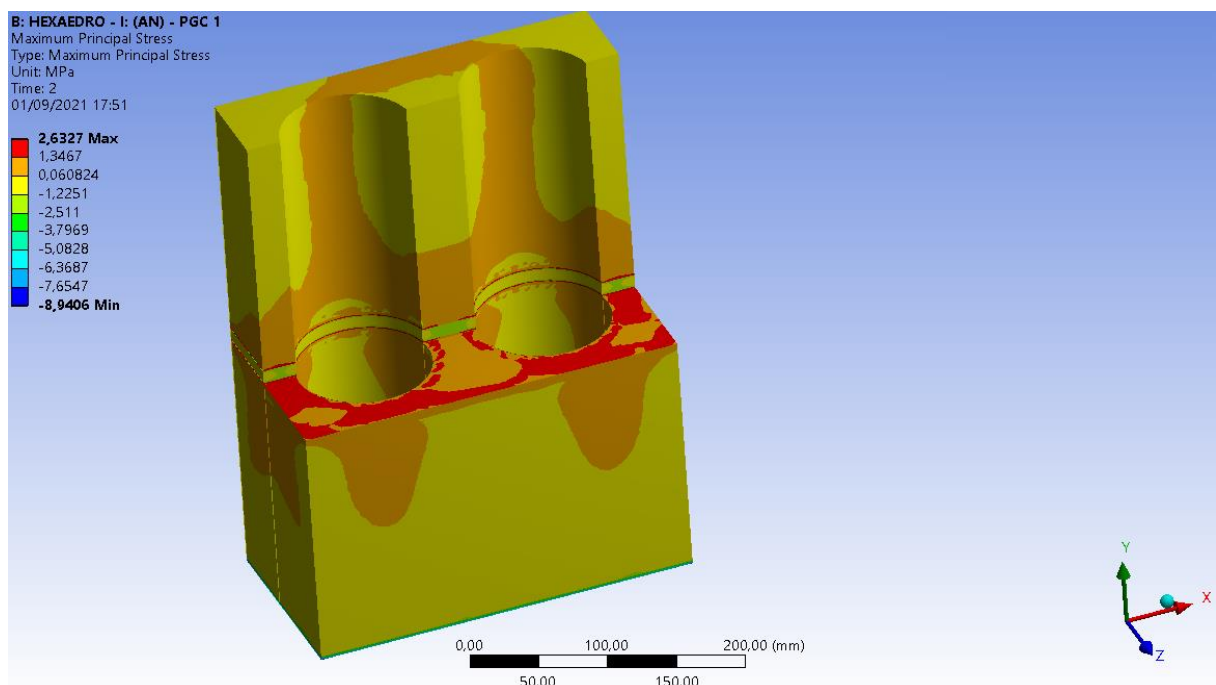
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 1



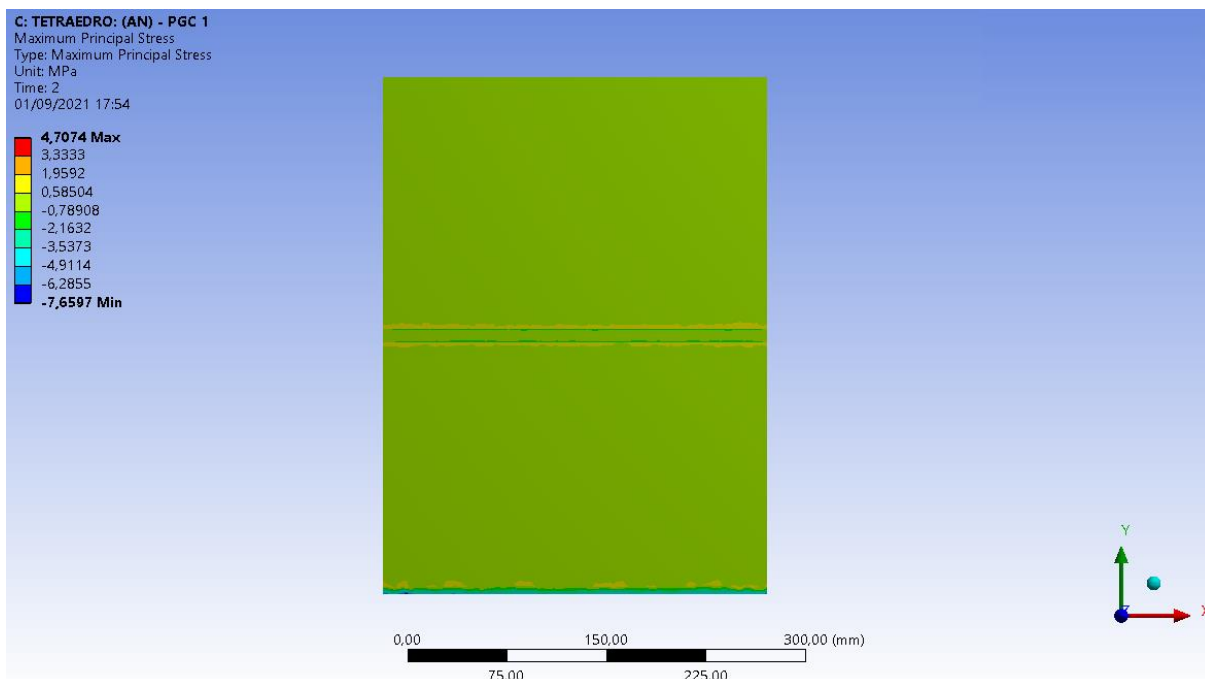
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 1



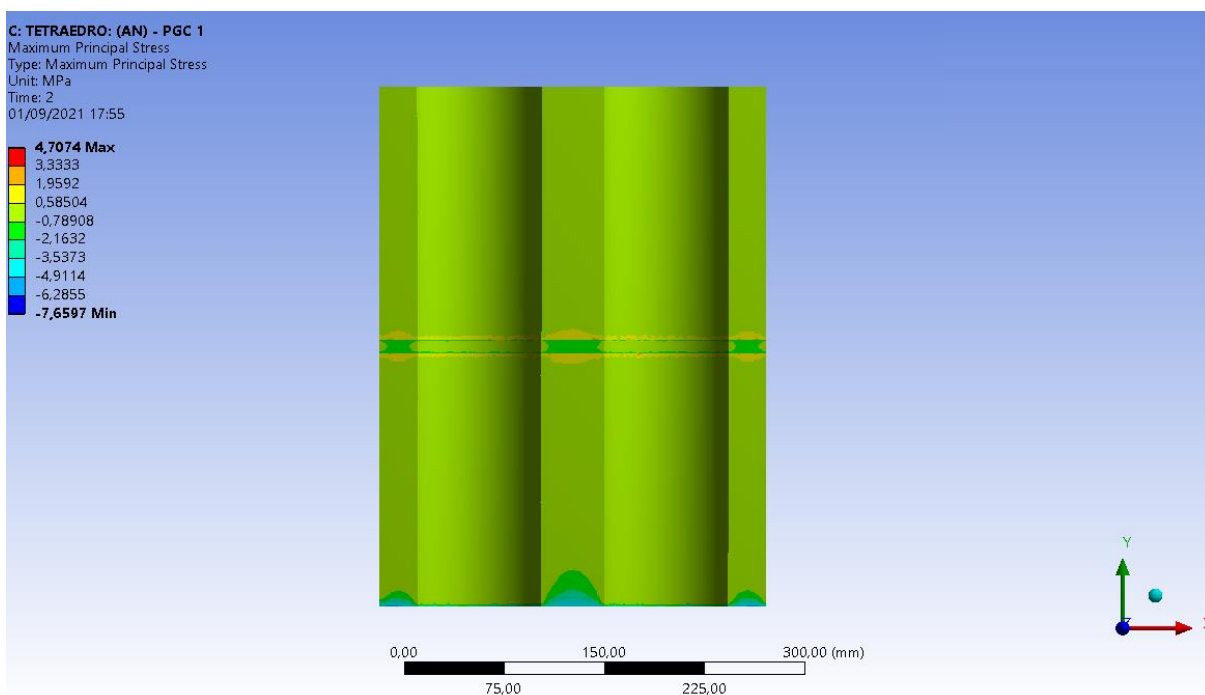
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



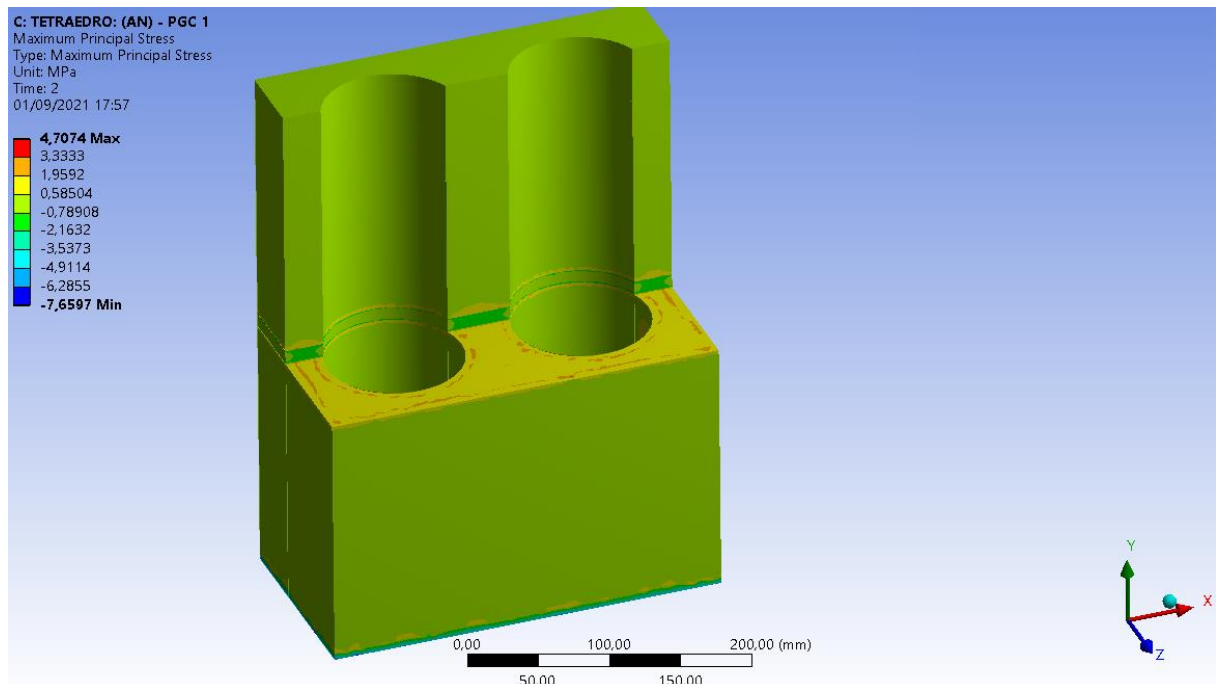
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



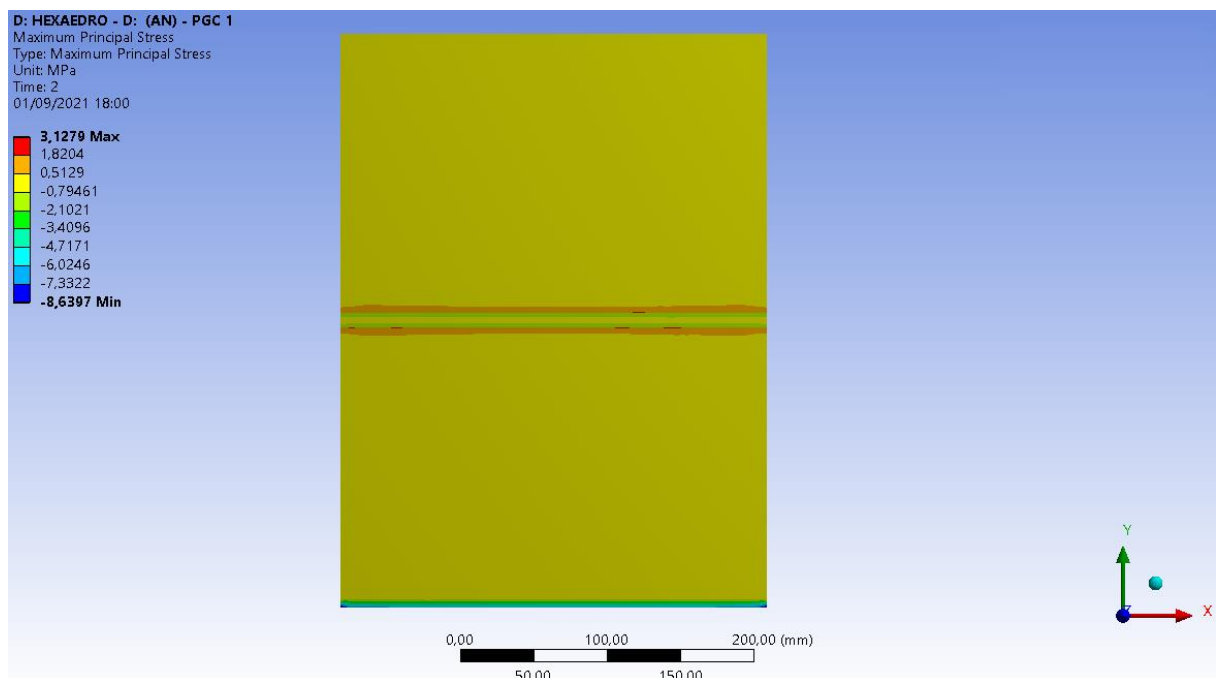
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 1



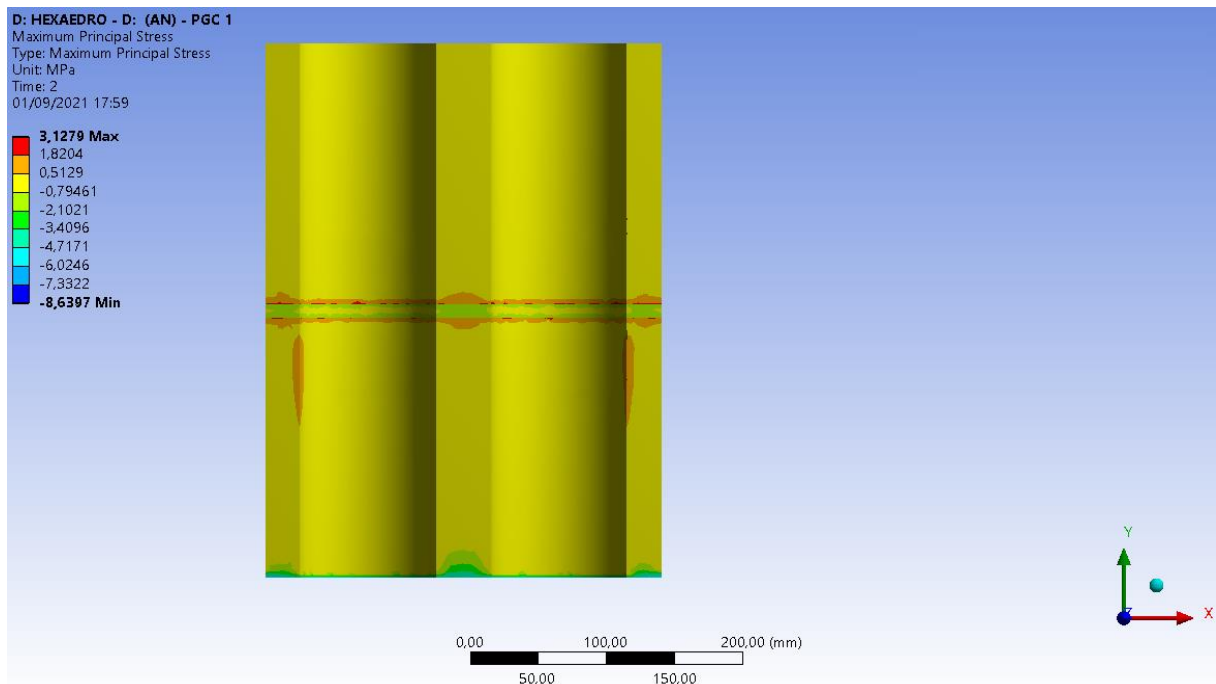
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



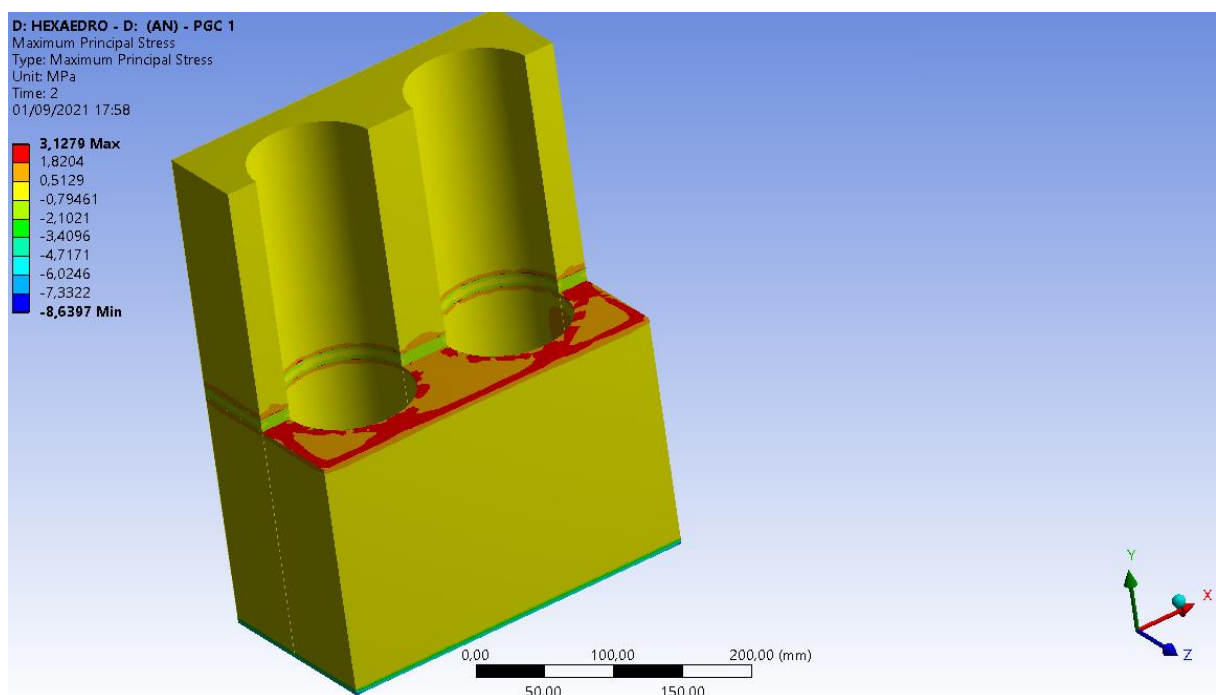
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



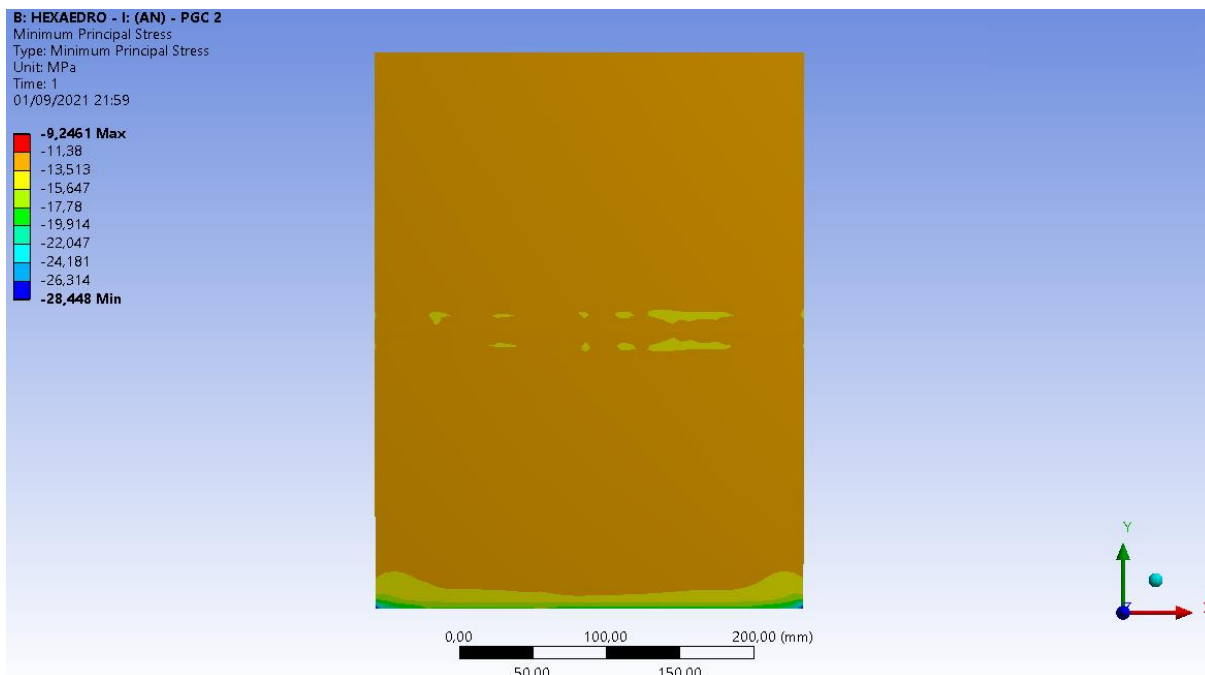
Fonte: Próprio autor

Figura B.1.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 1



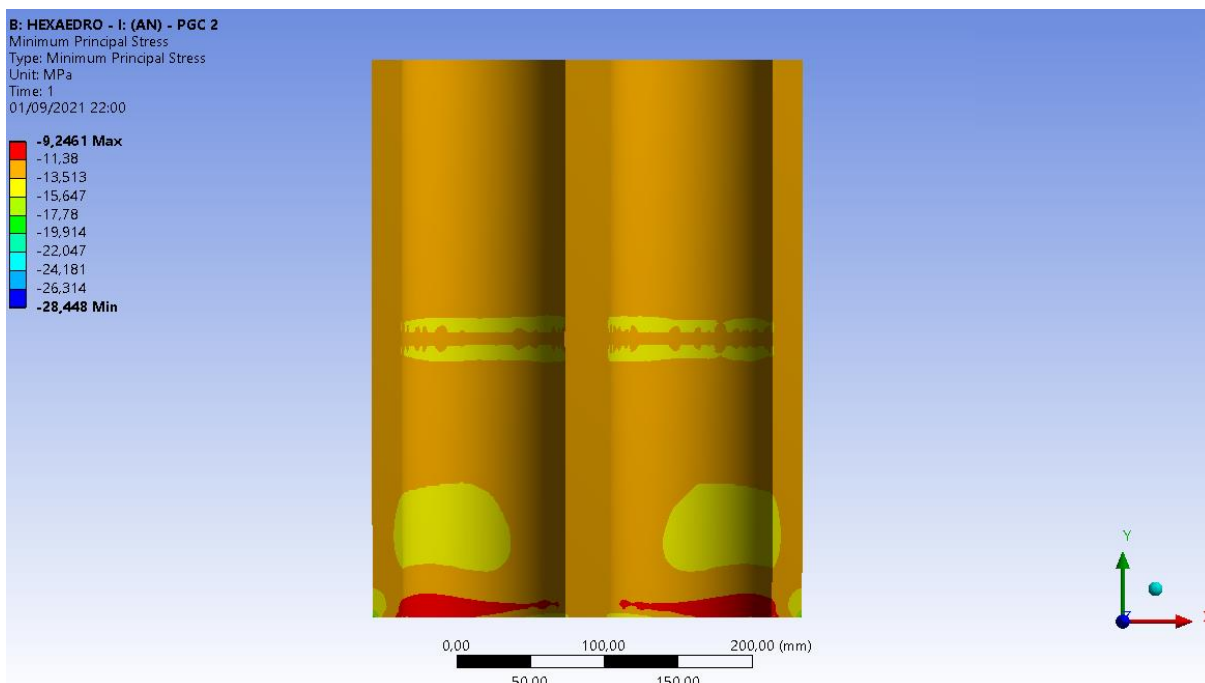
Fonte: Próprio autor

Figura B.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



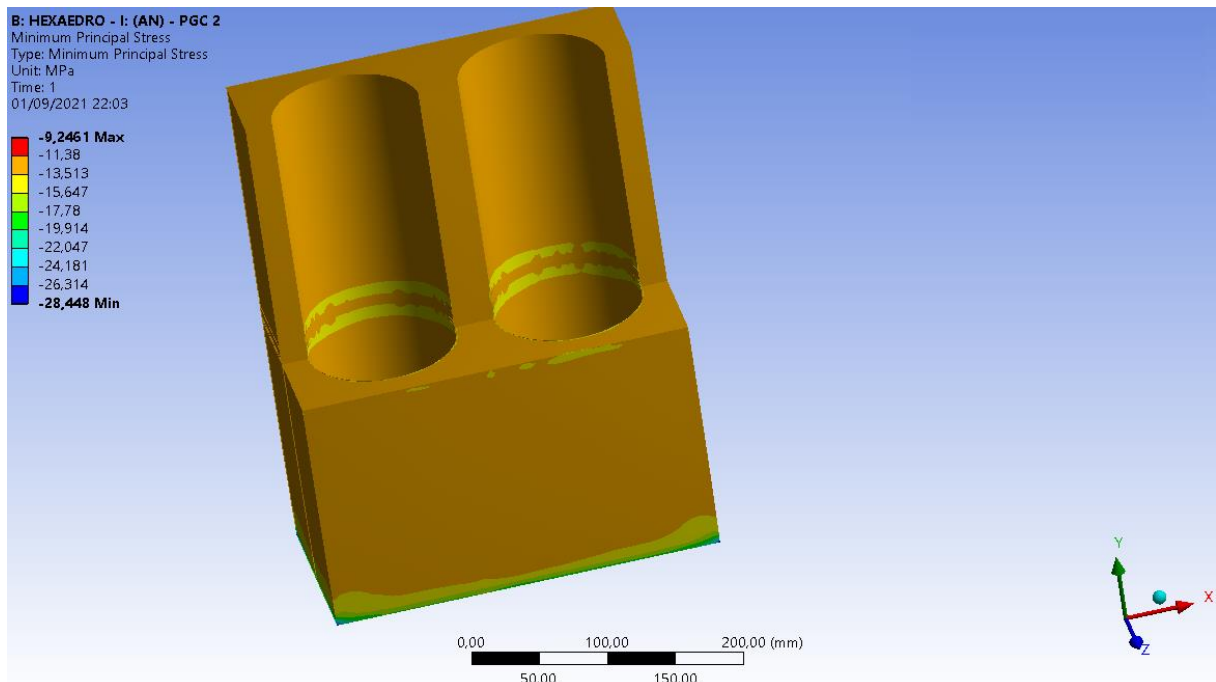
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



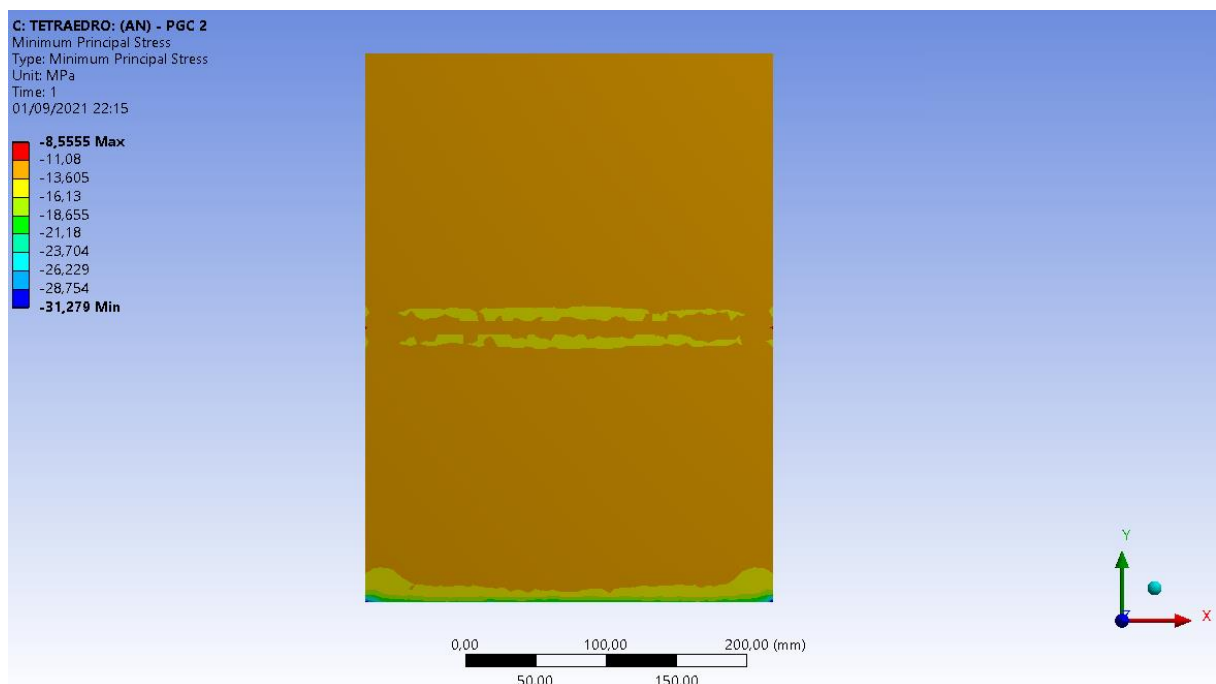
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



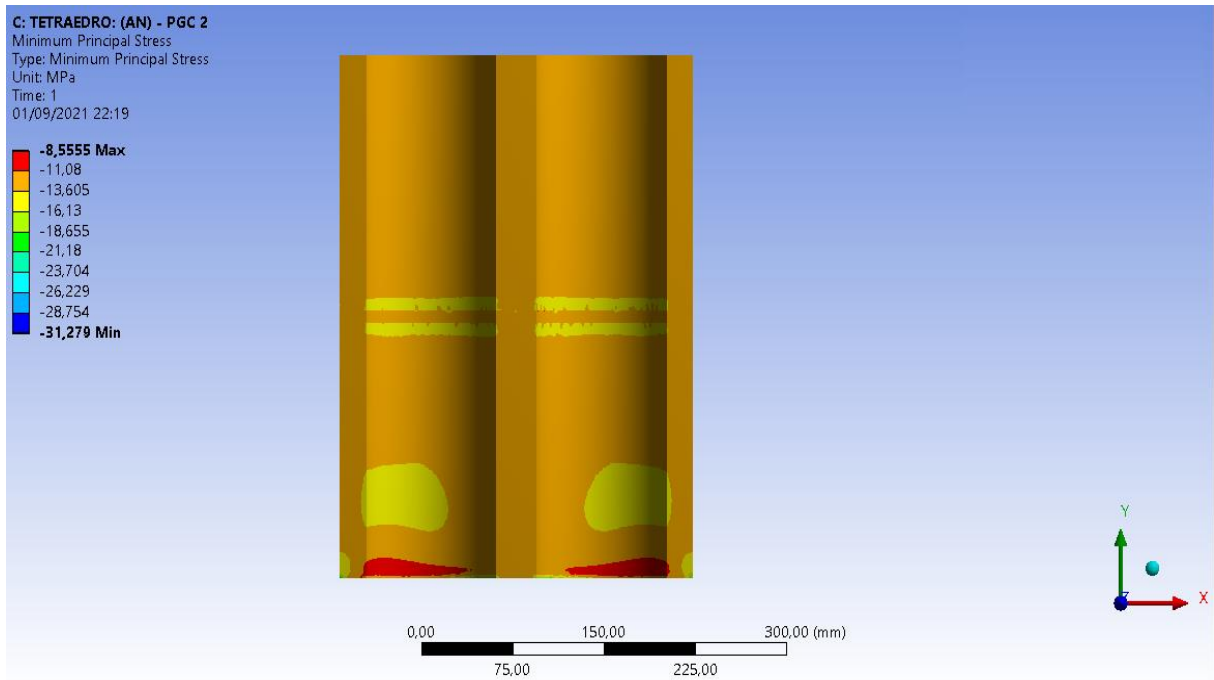
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



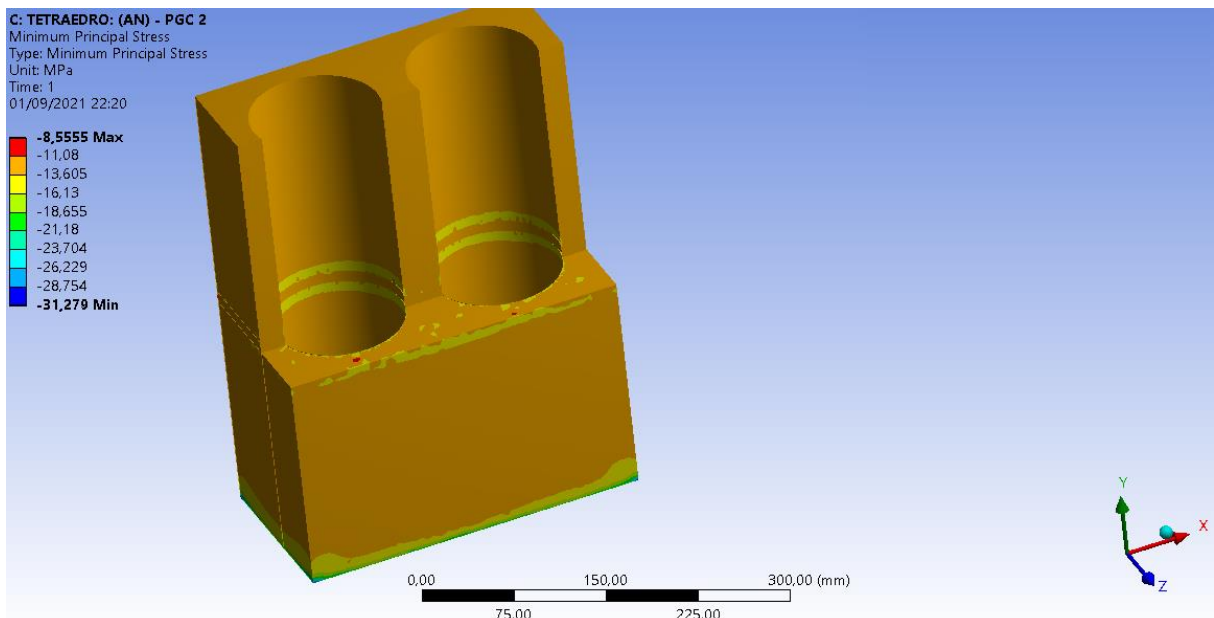
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



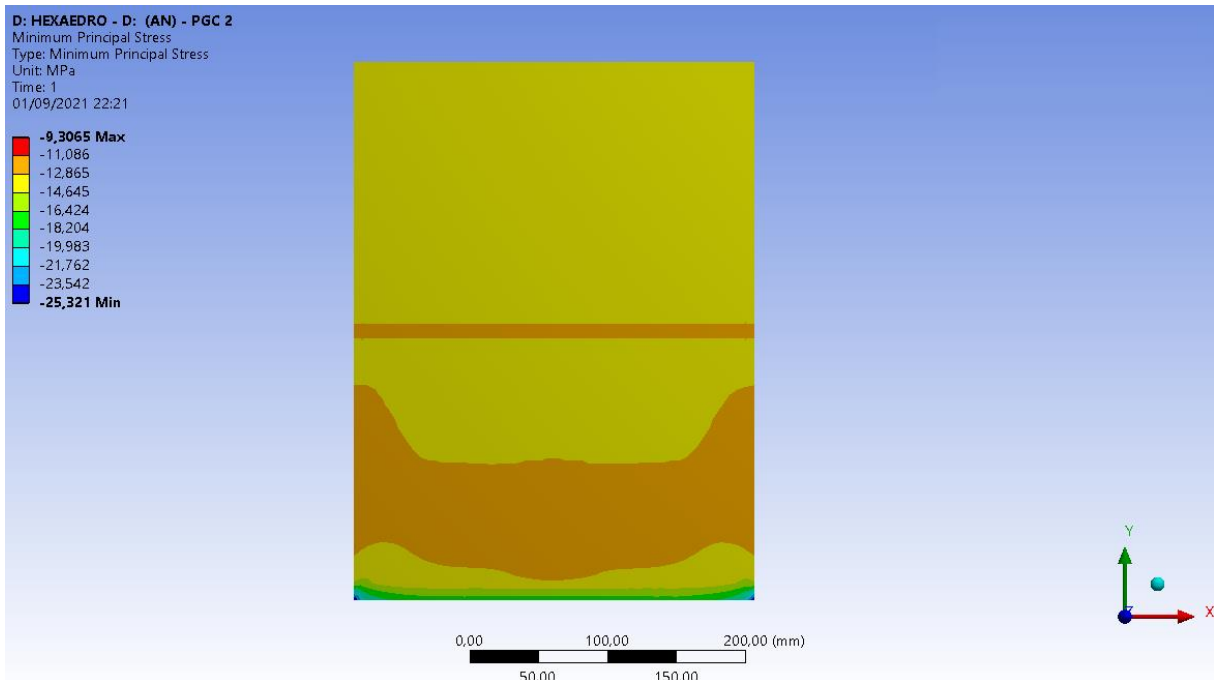
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



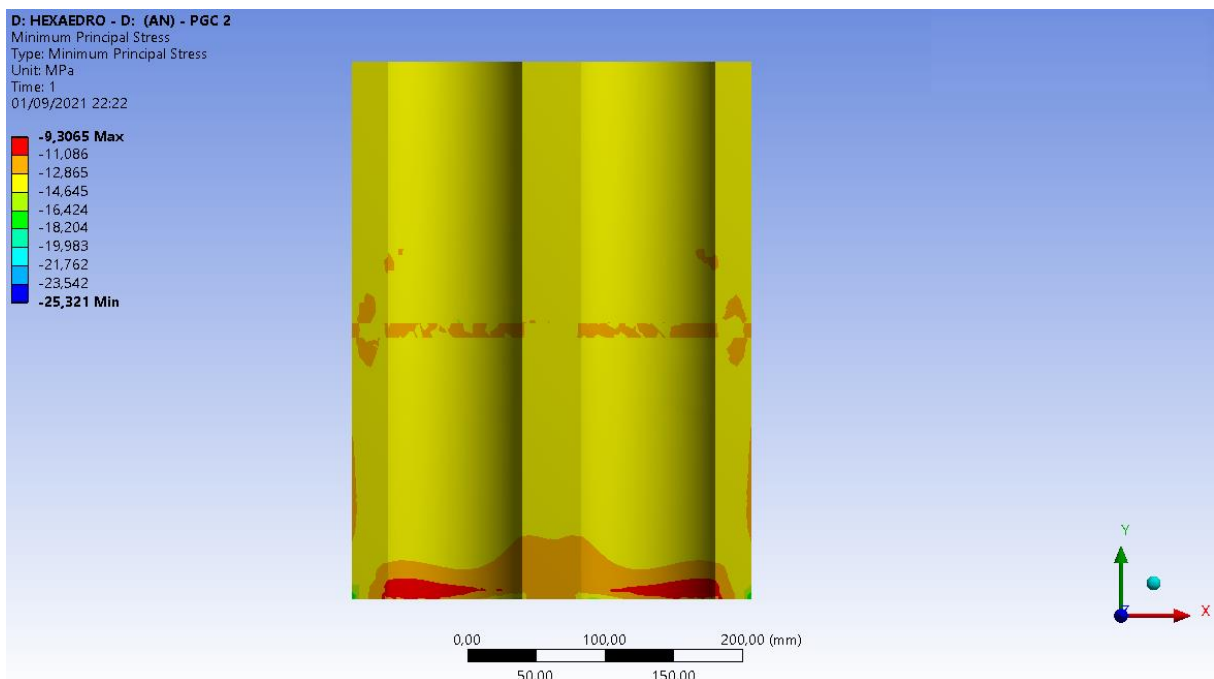
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



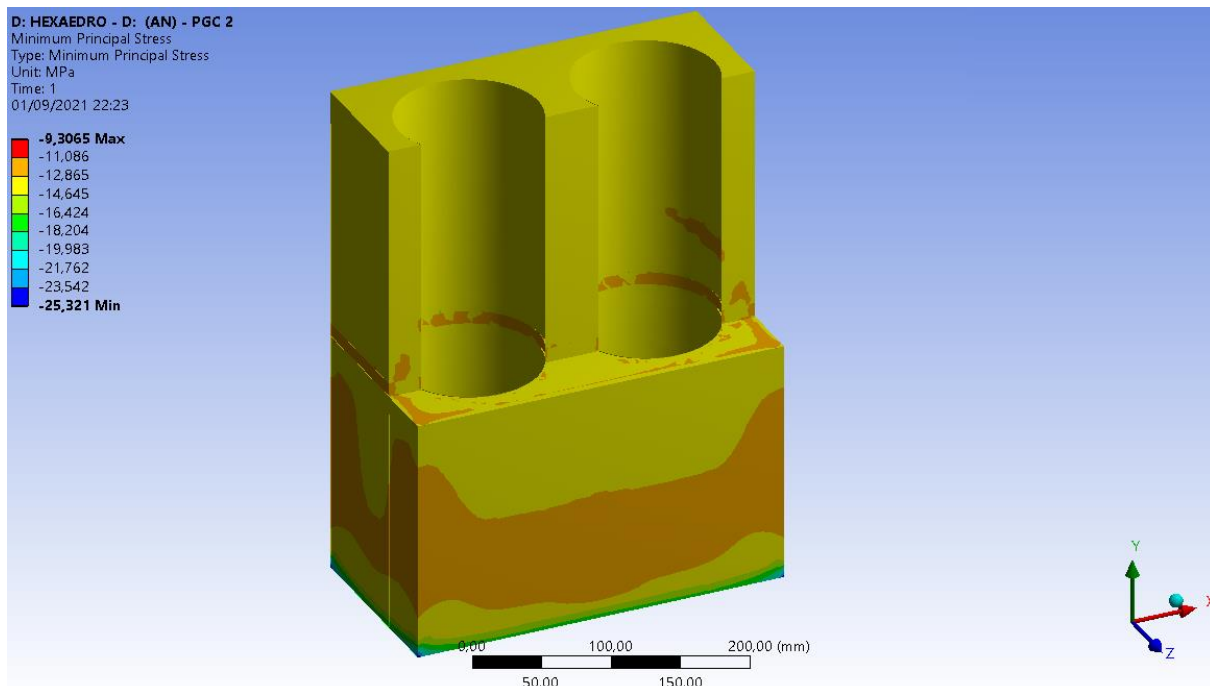
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



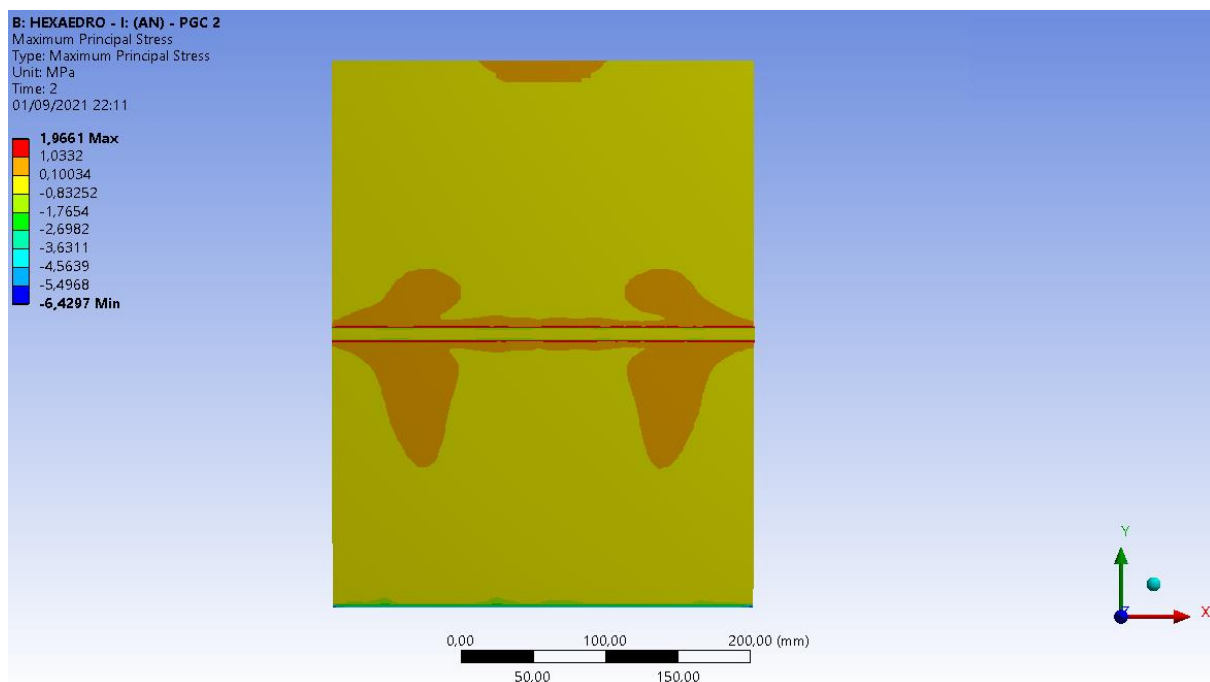
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



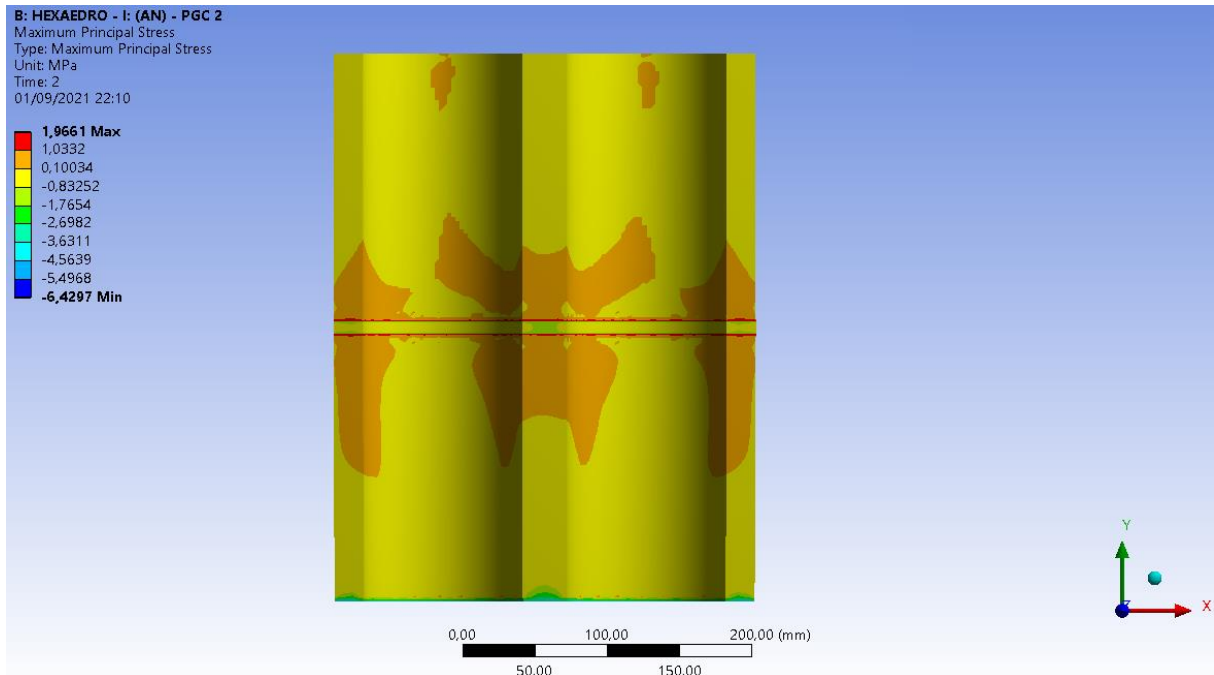
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



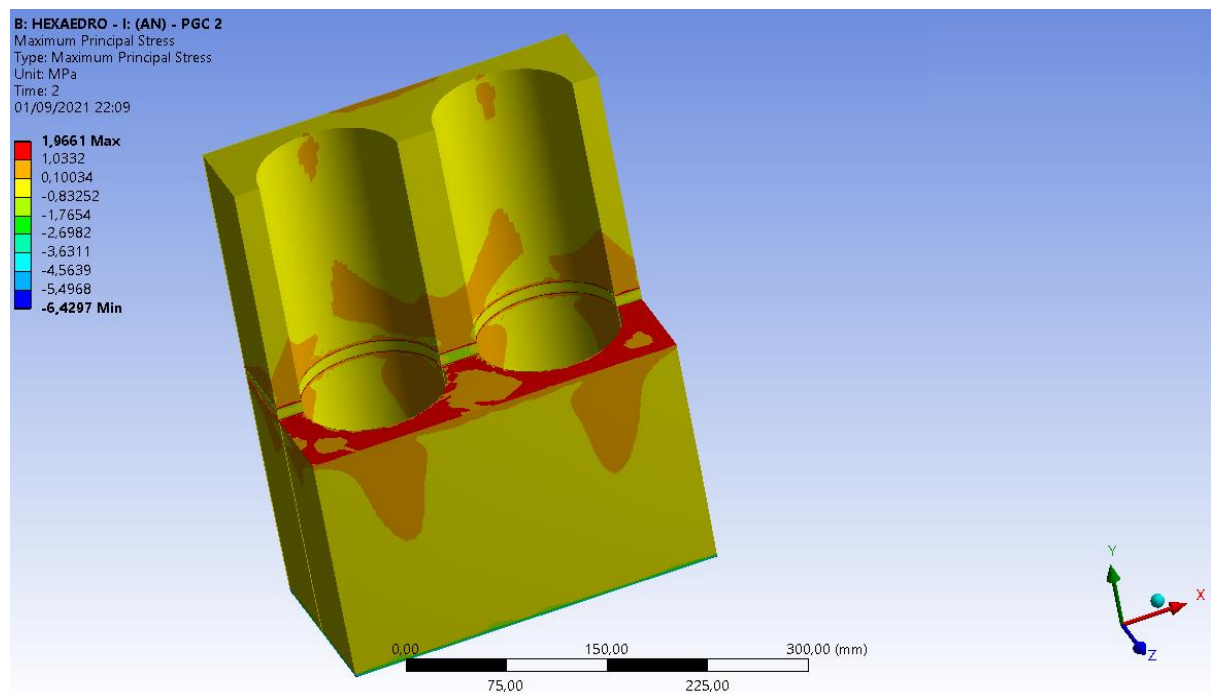
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



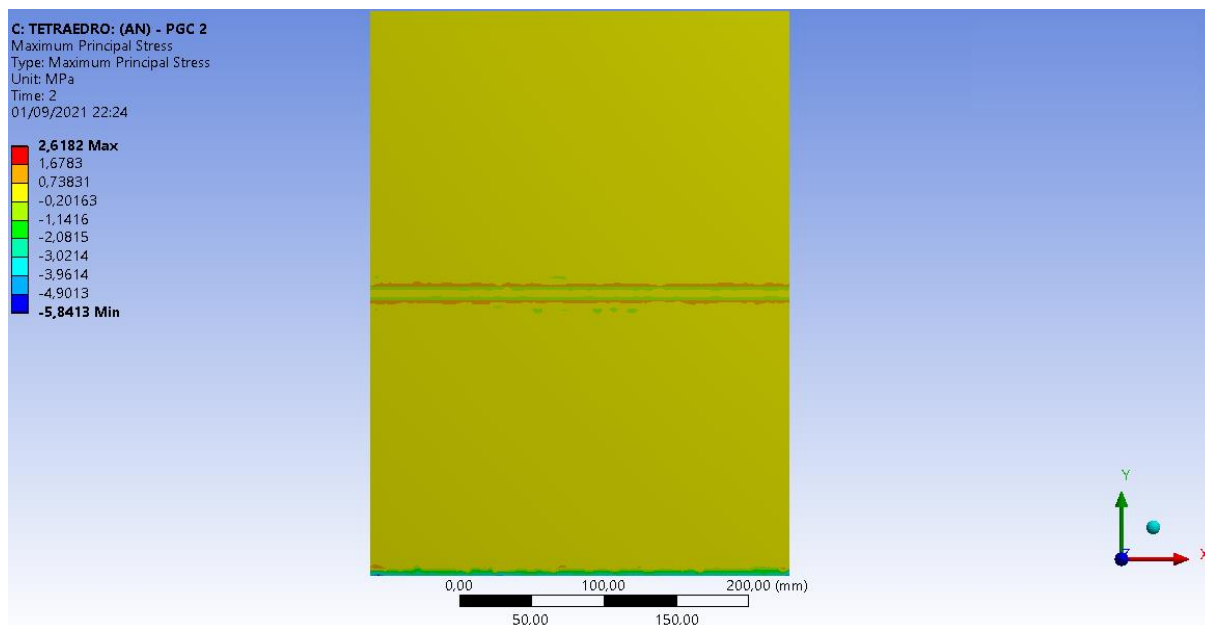
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGC 2



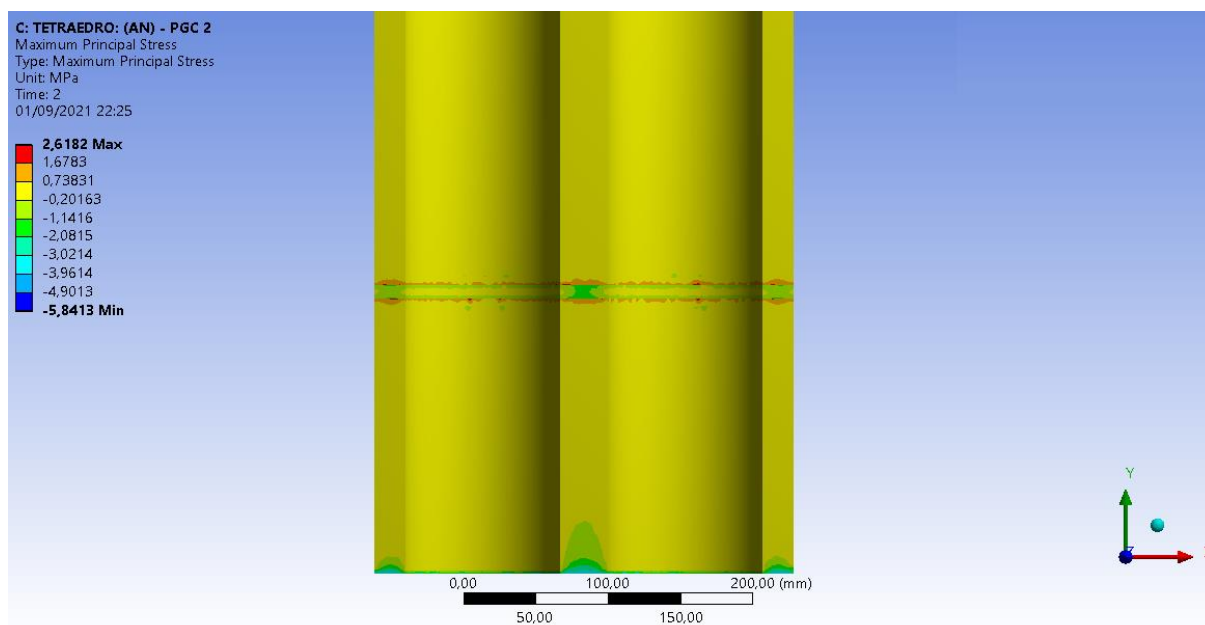
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



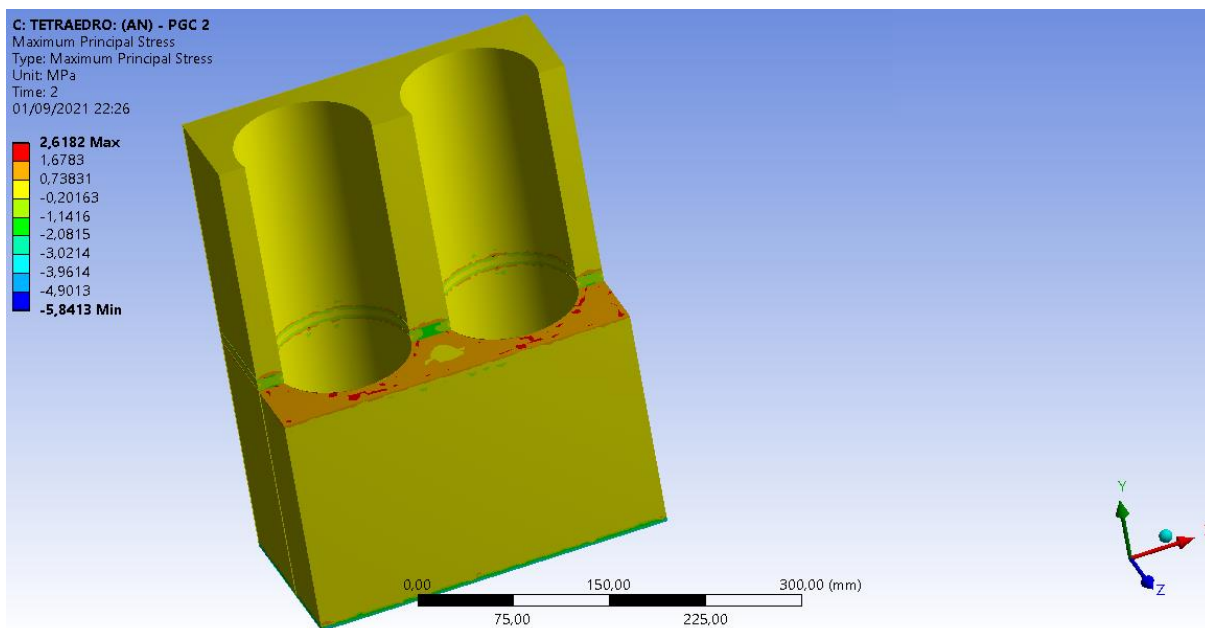
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



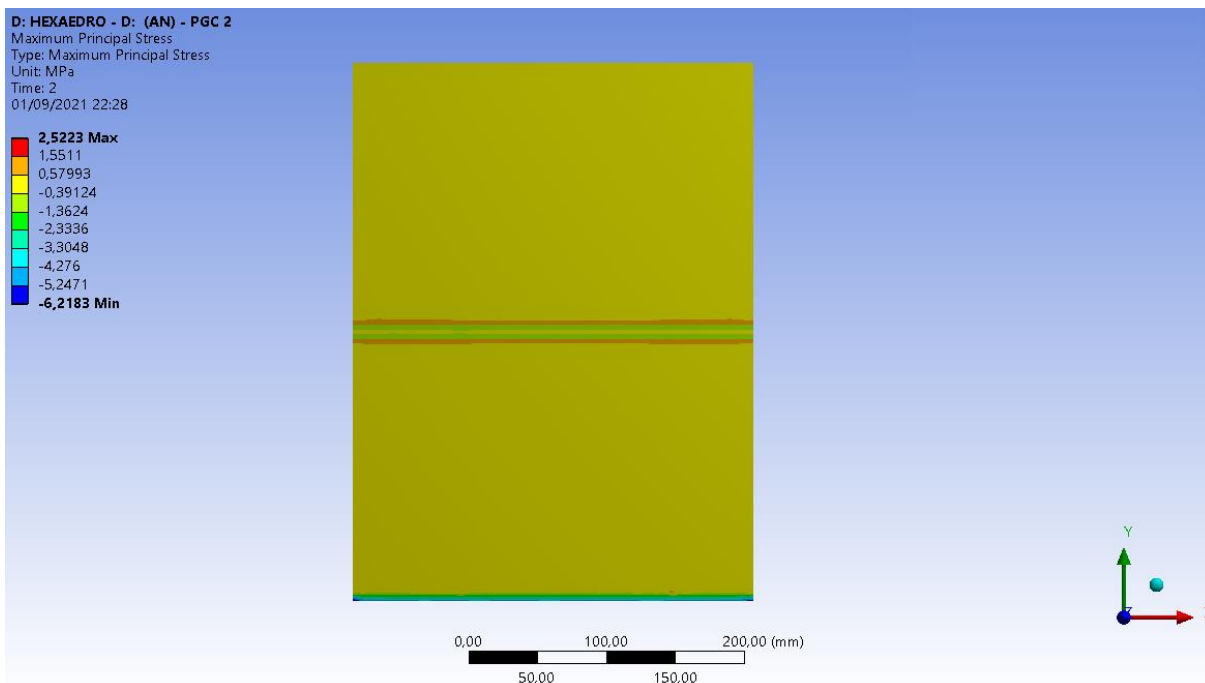
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGC 2



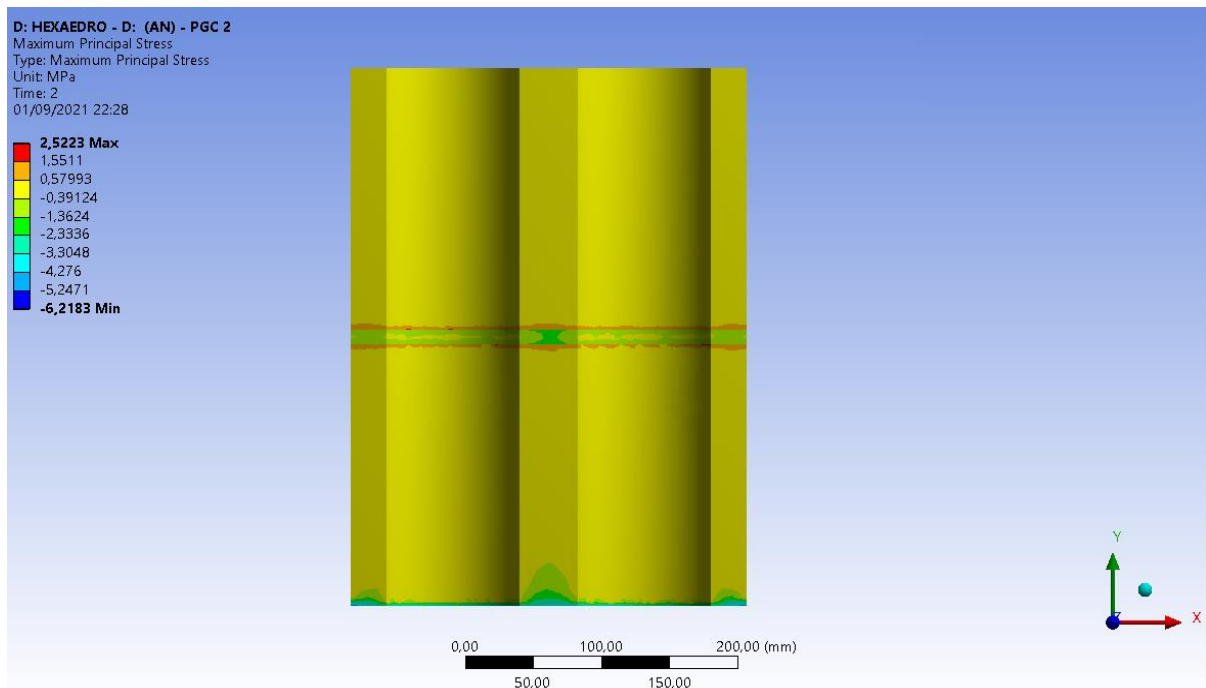
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



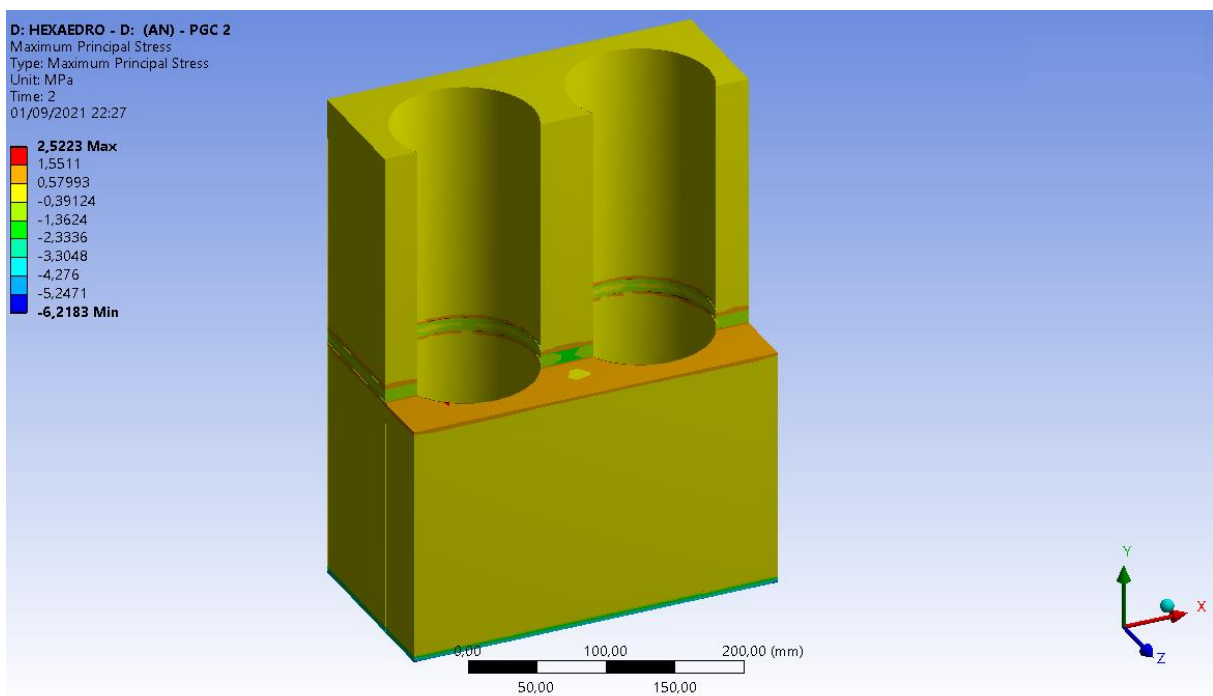
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



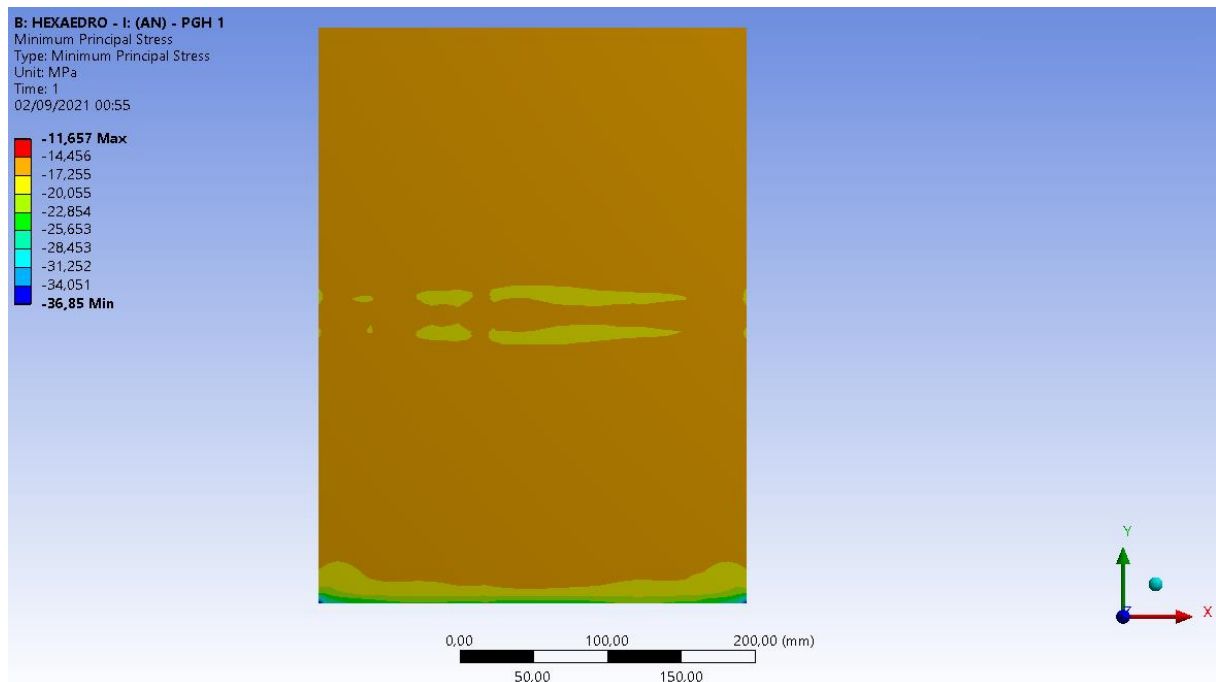
Fonte: Próprio autor

Figura B.2.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGC 2



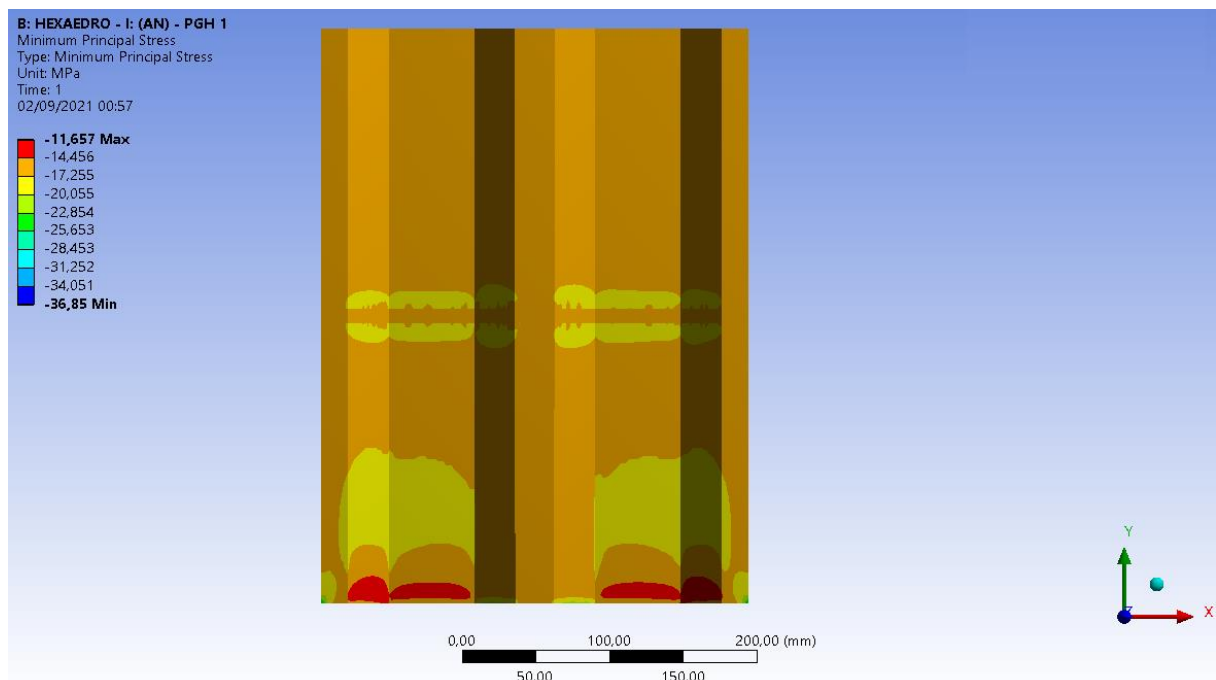
Fonte: Próprio autor

Figura B.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



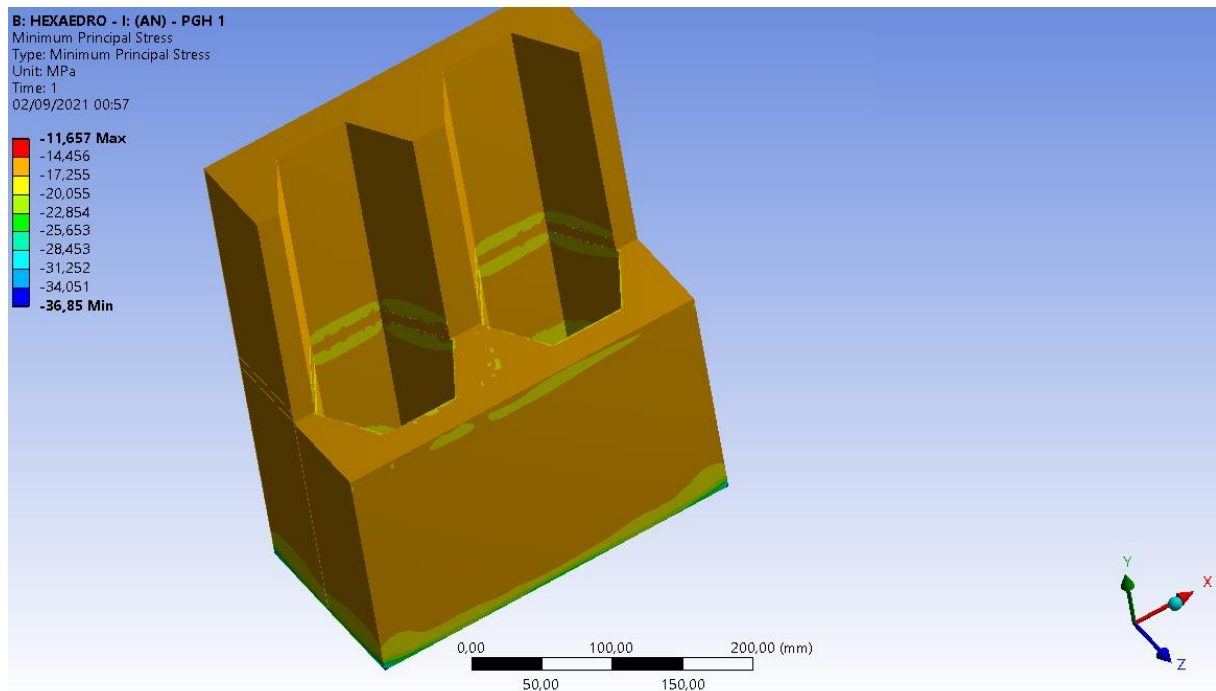
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



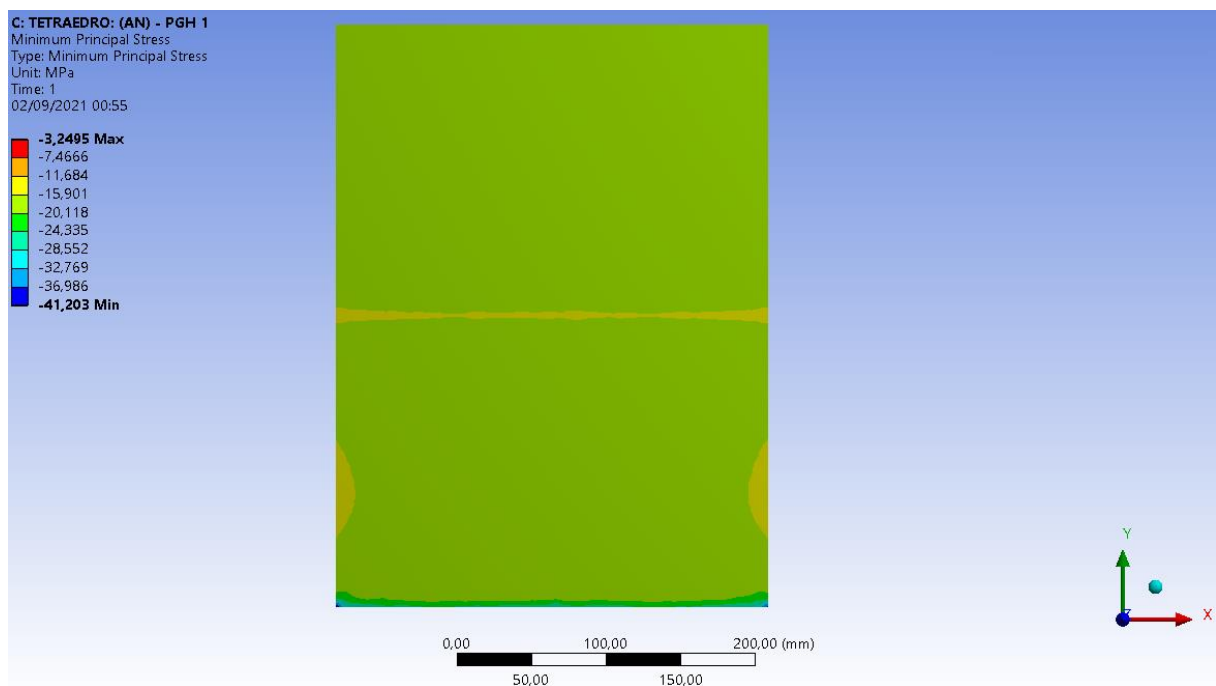
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



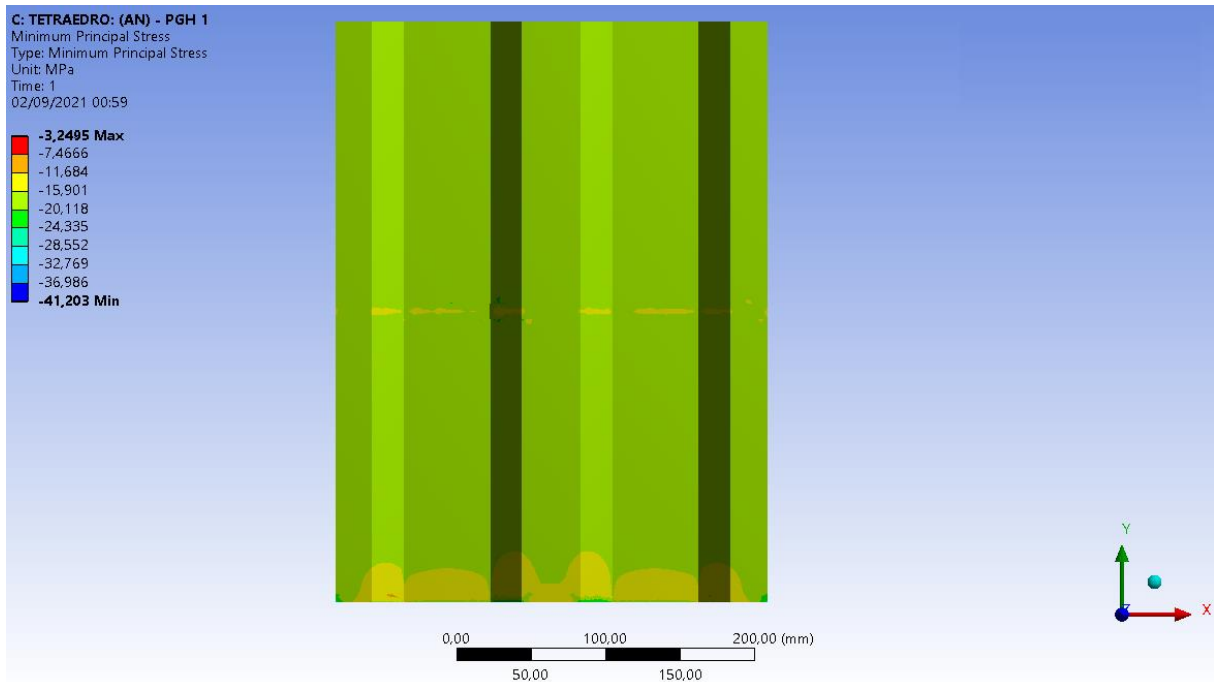
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



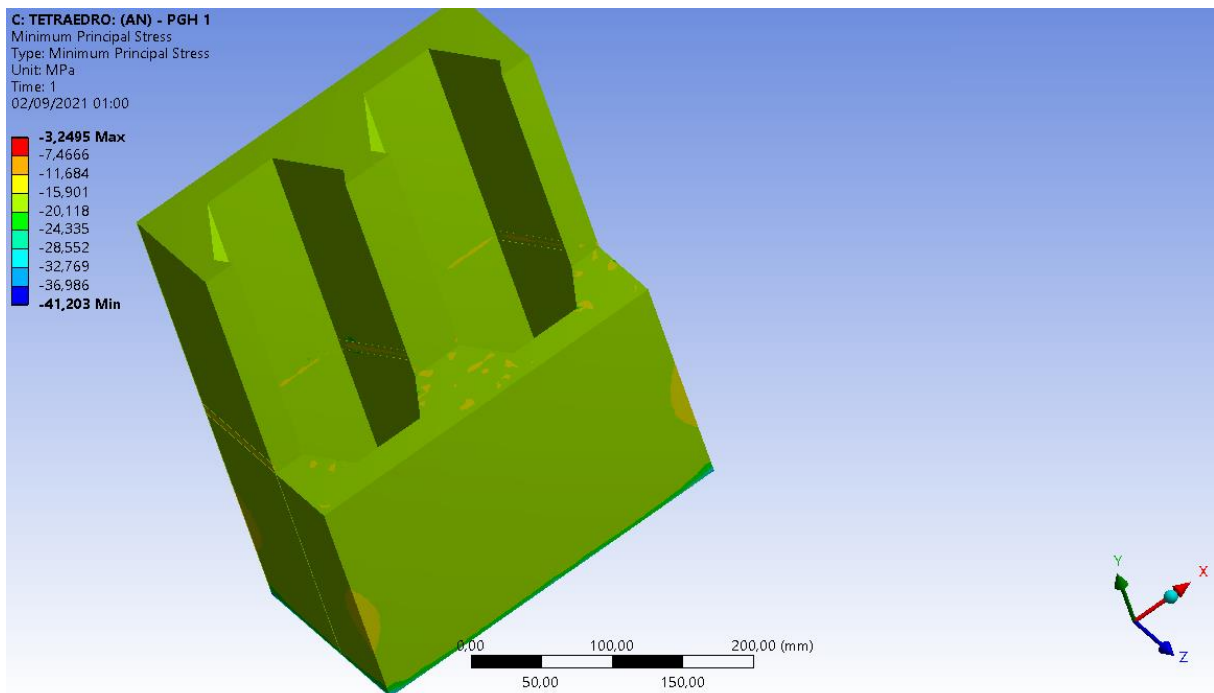
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



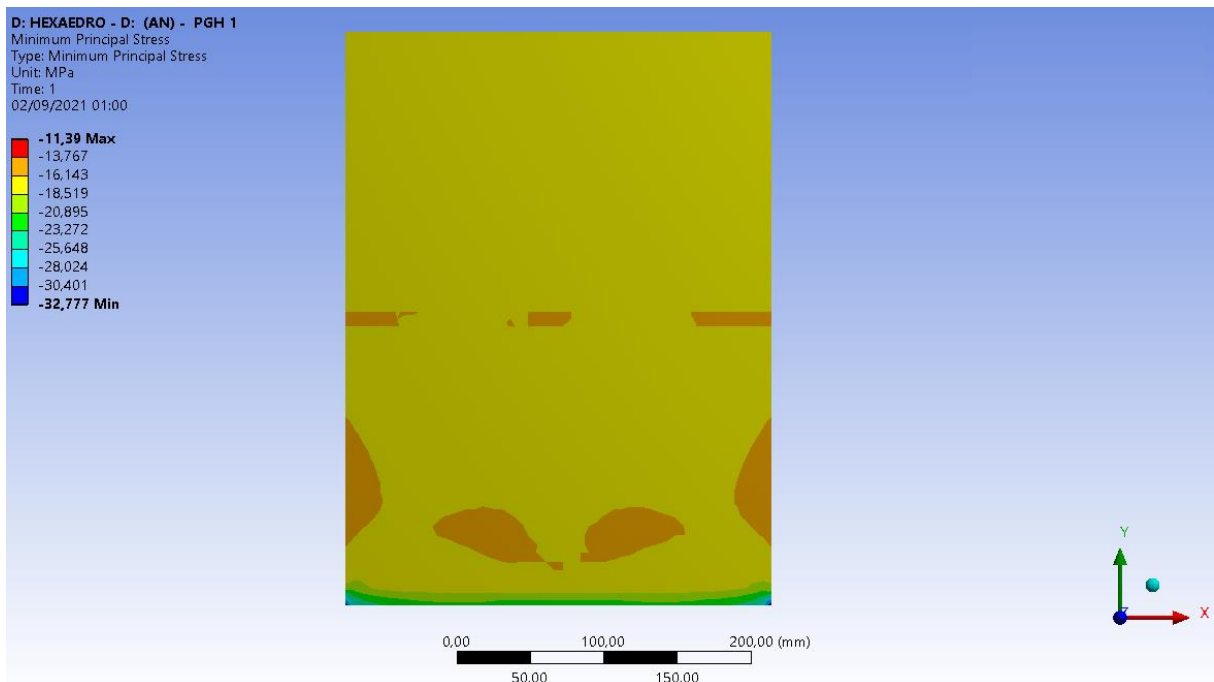
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



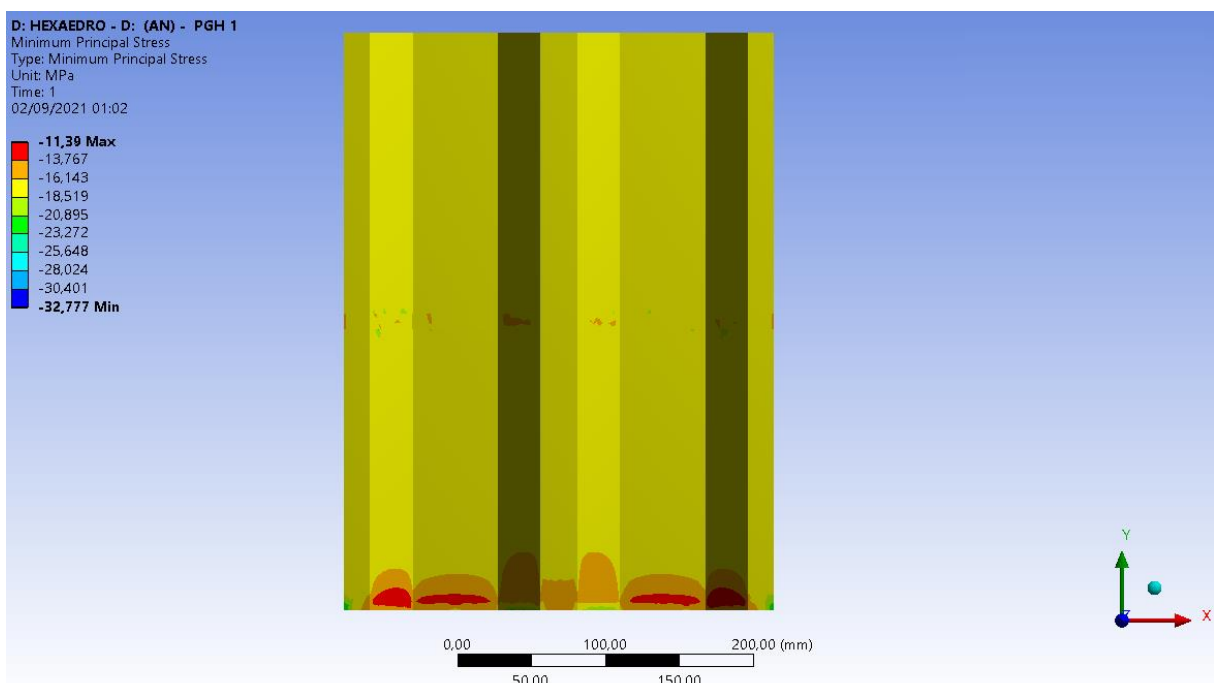
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



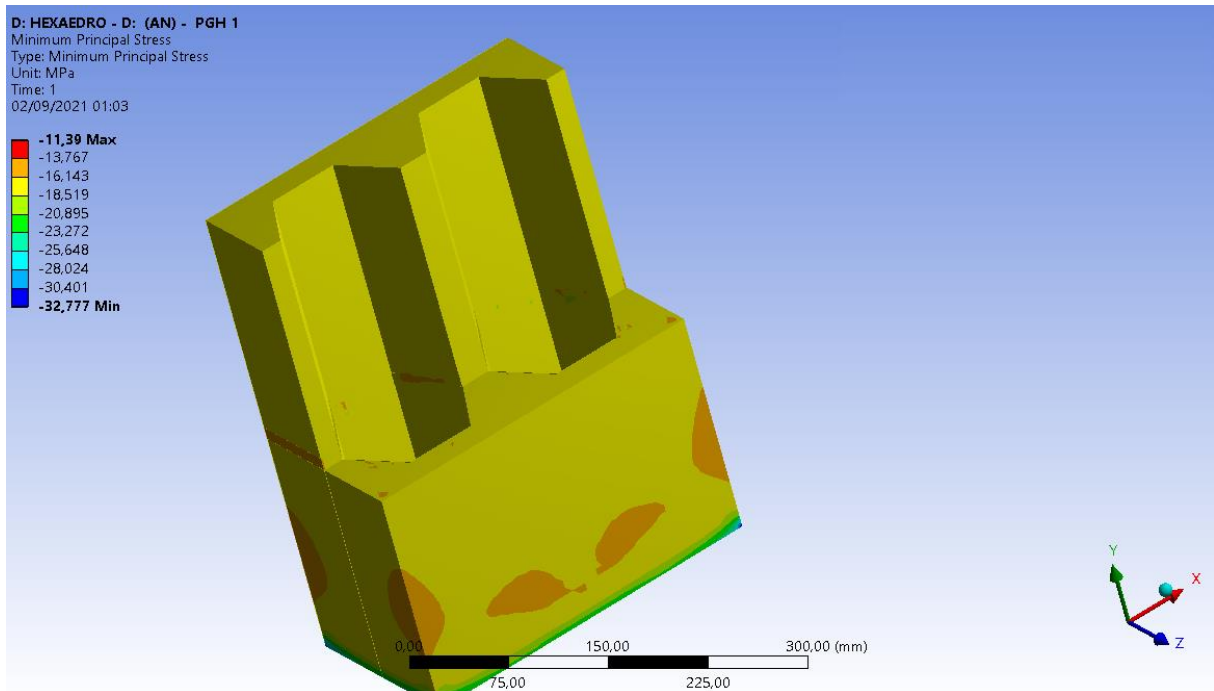
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



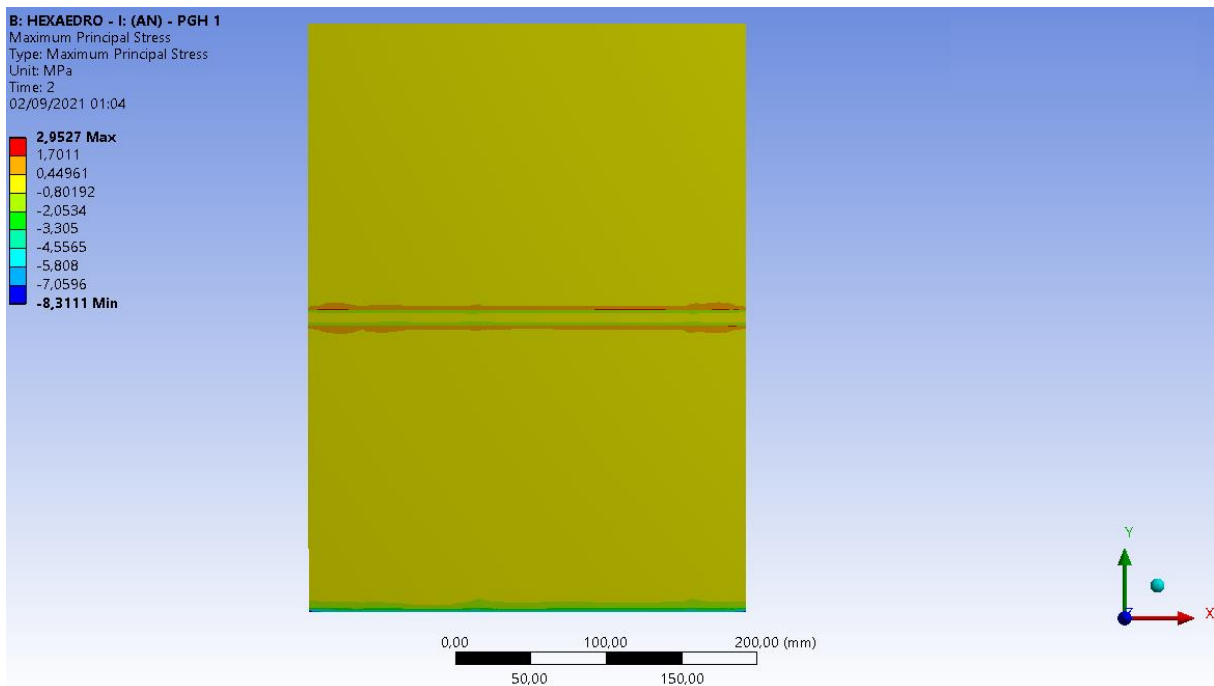
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



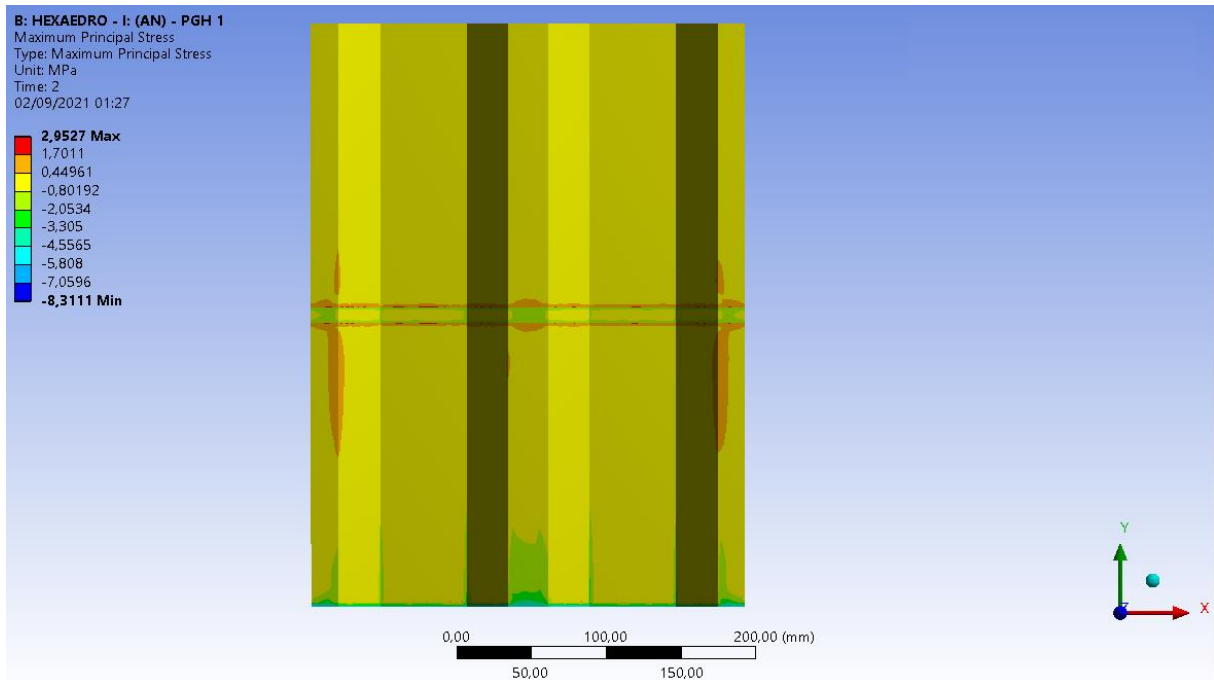
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



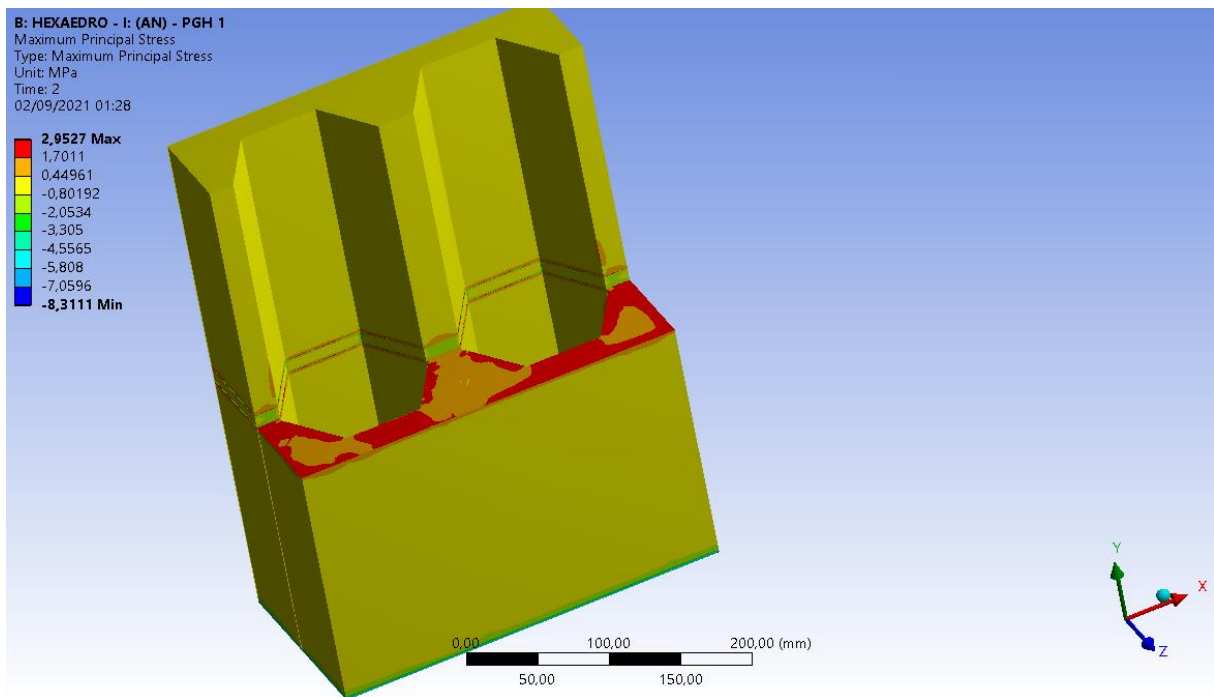
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



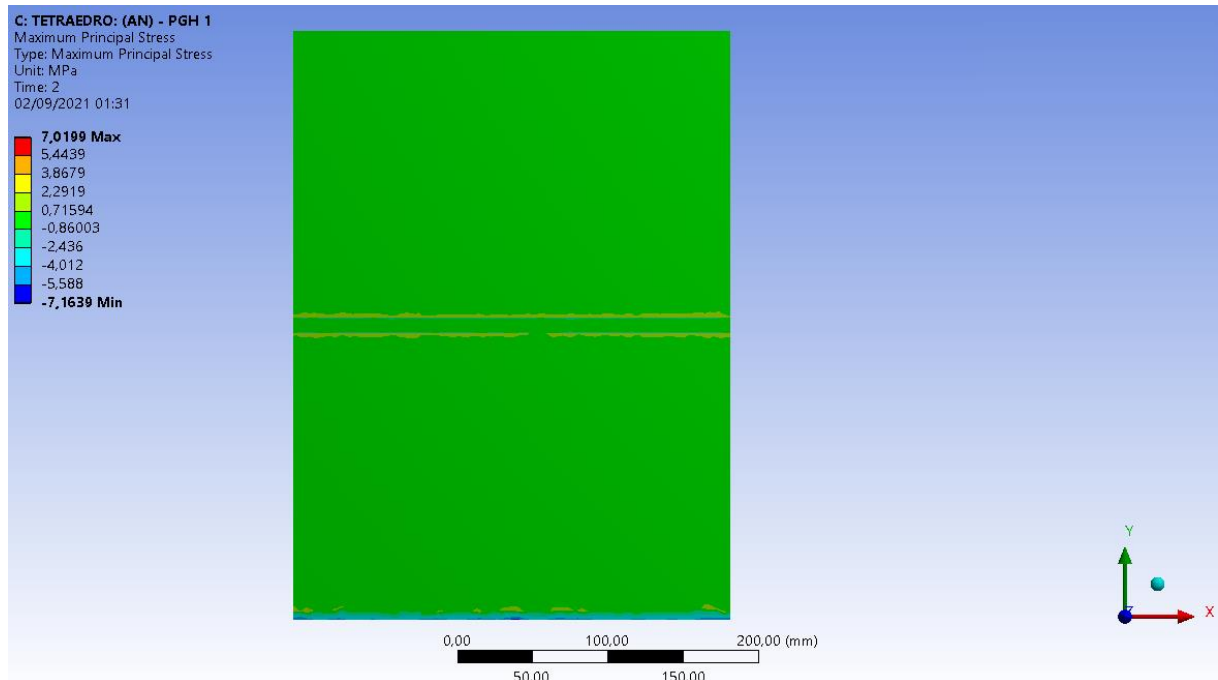
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 1



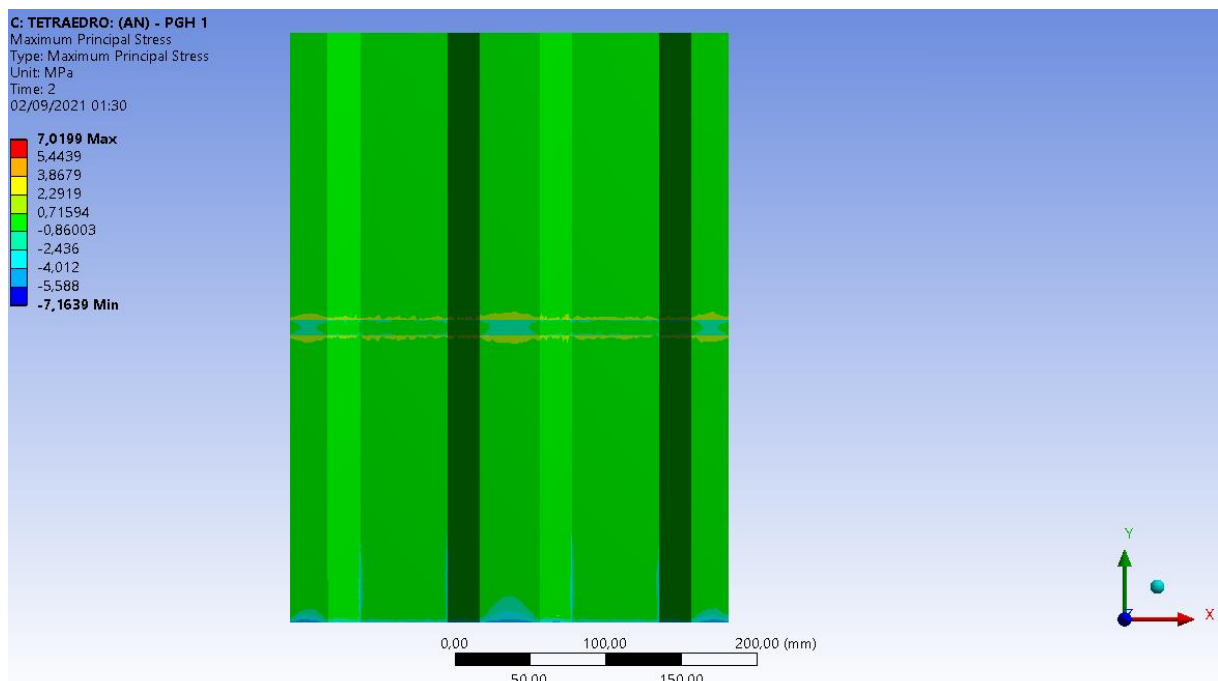
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



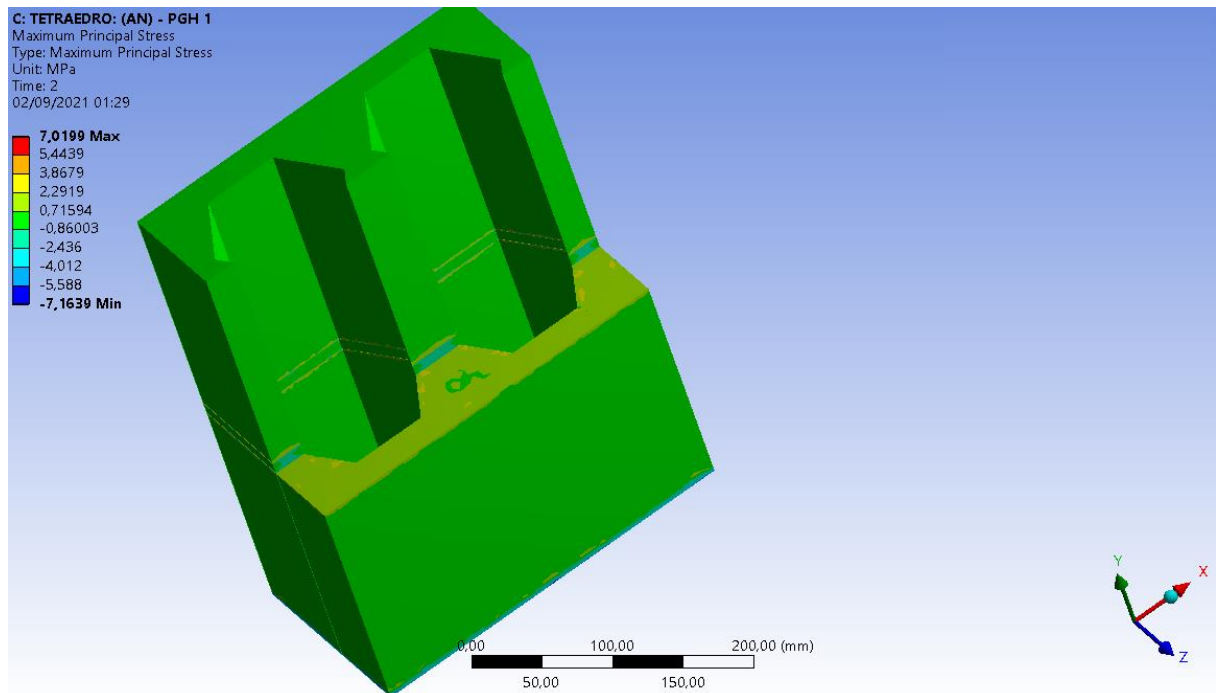
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



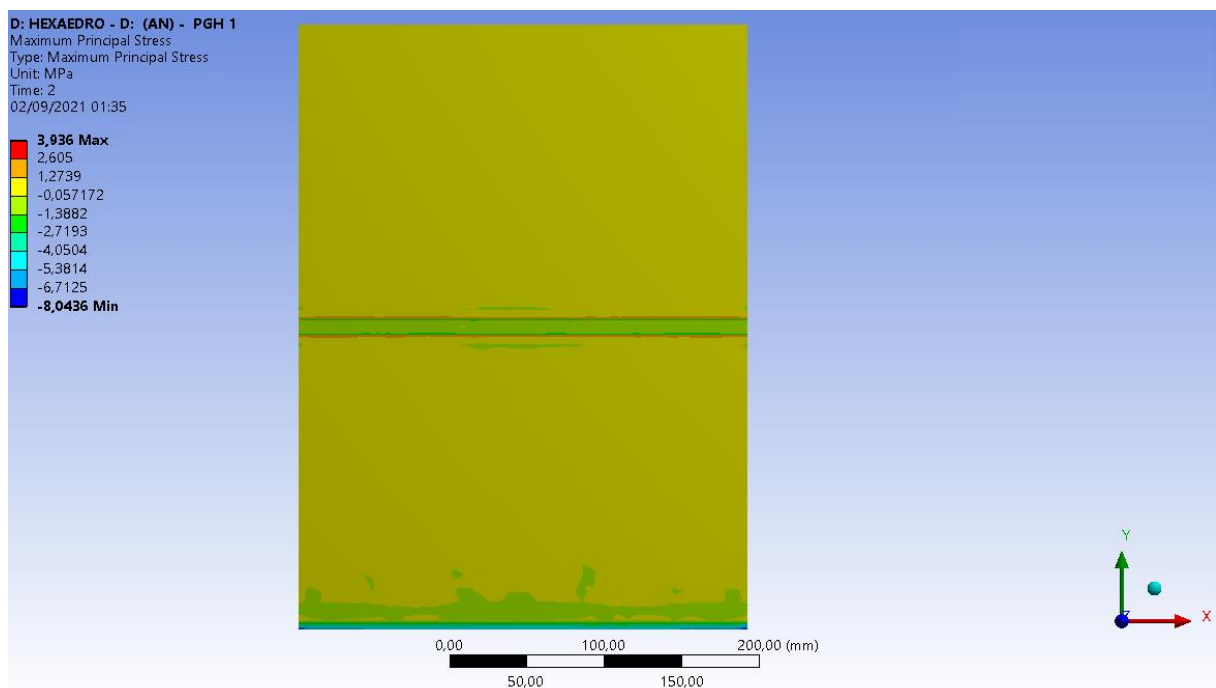
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 1



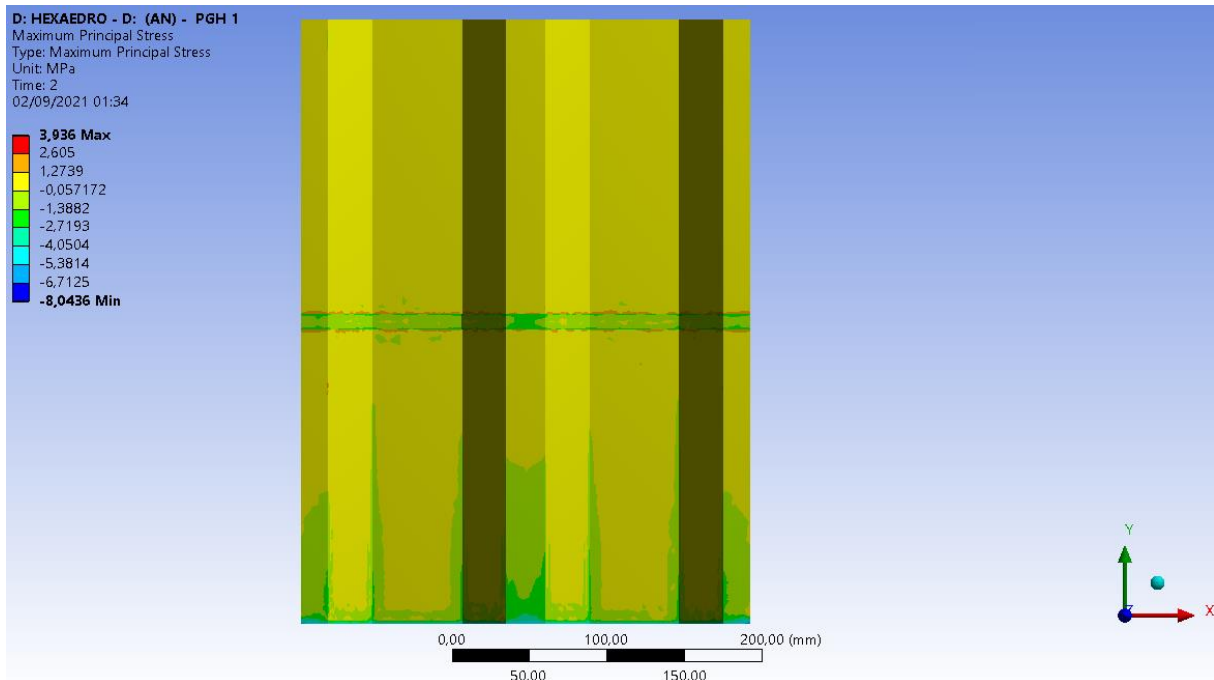
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



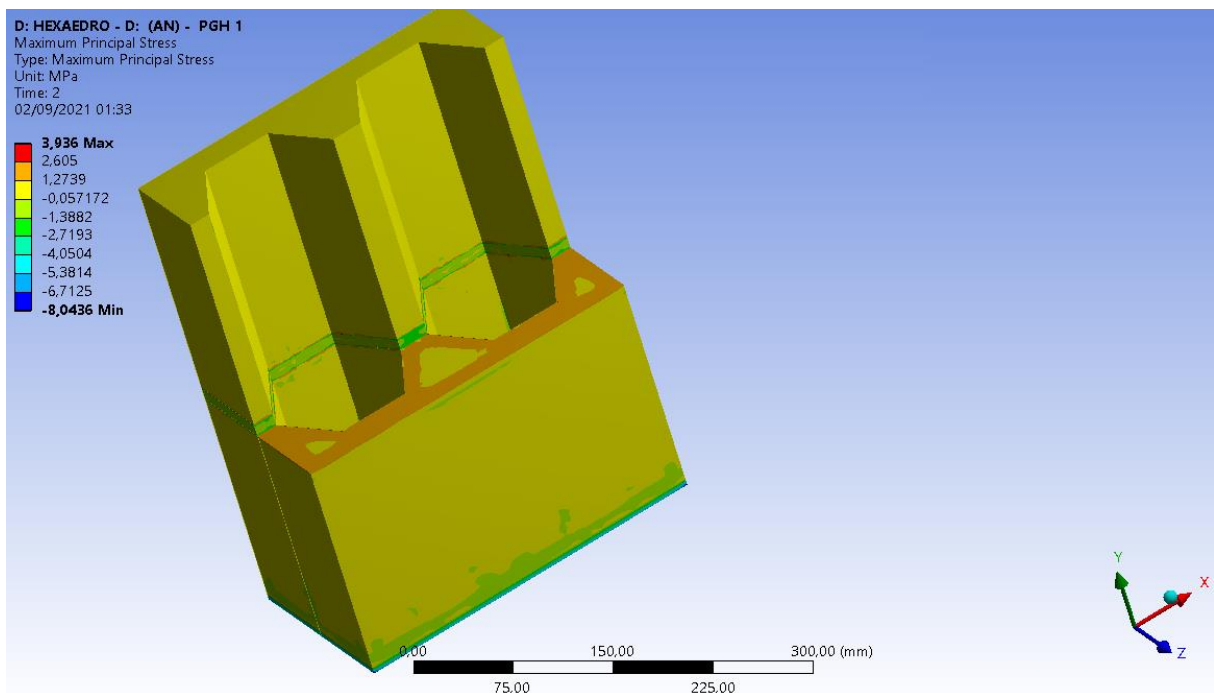
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



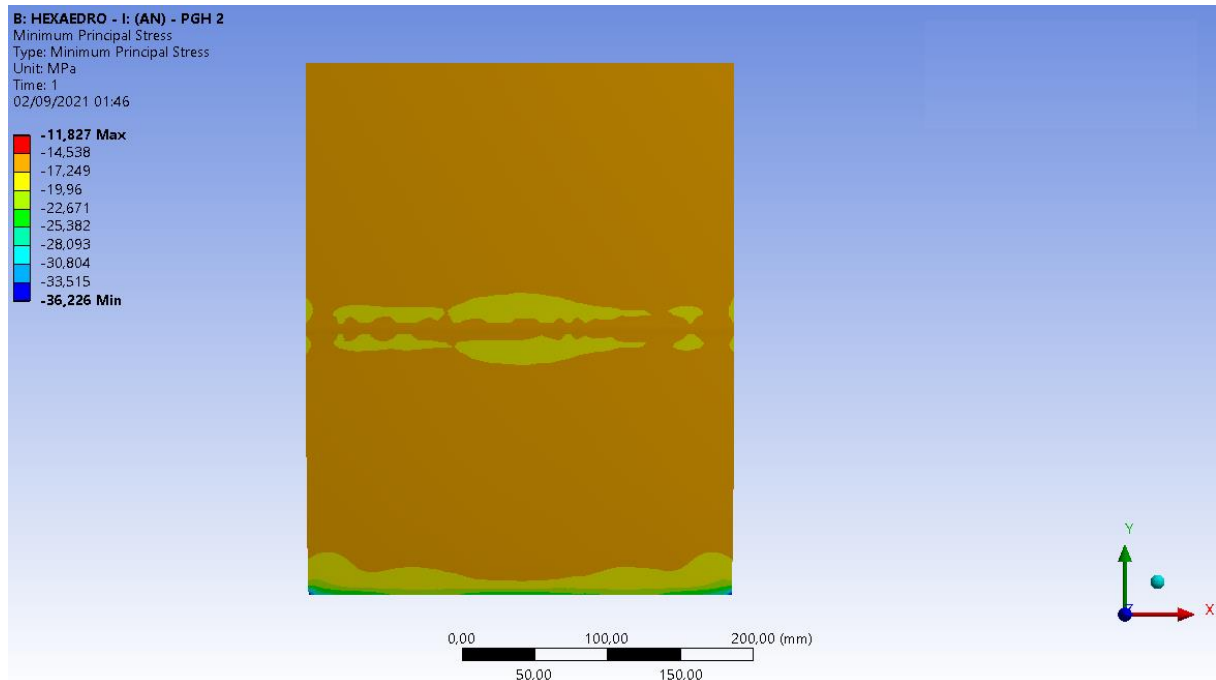
Fonte: Próprio autor

Figura B.3.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 1



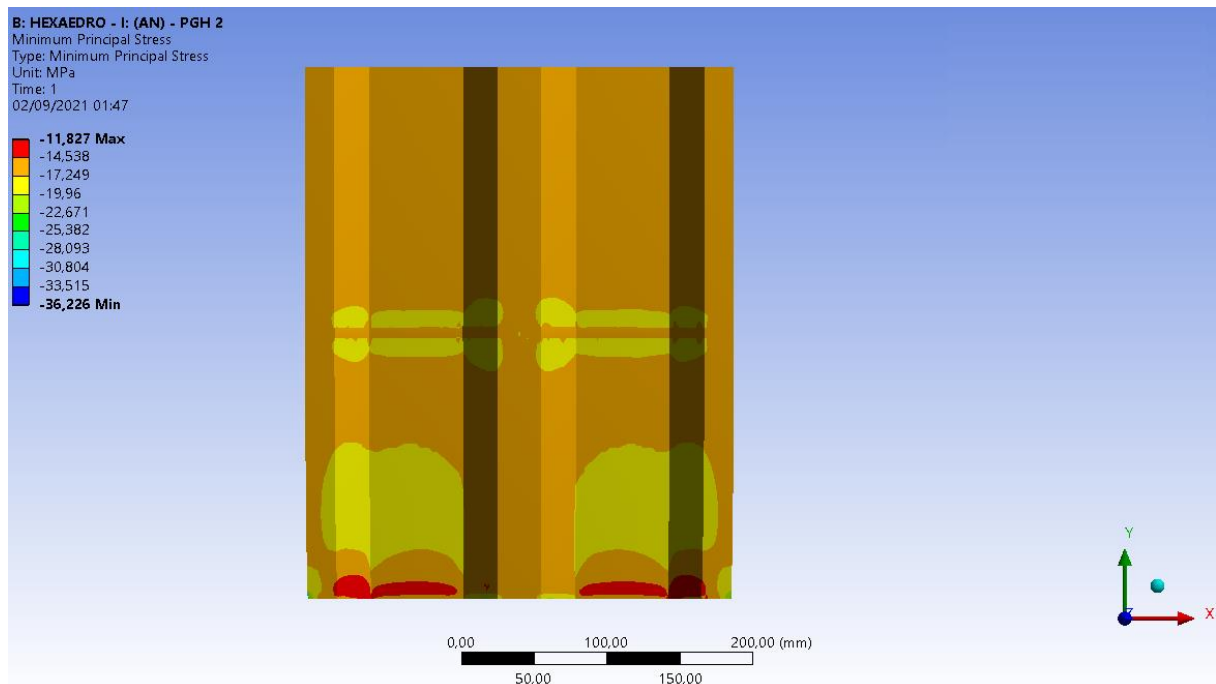
Fonte: Próprio autor

Figura B.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



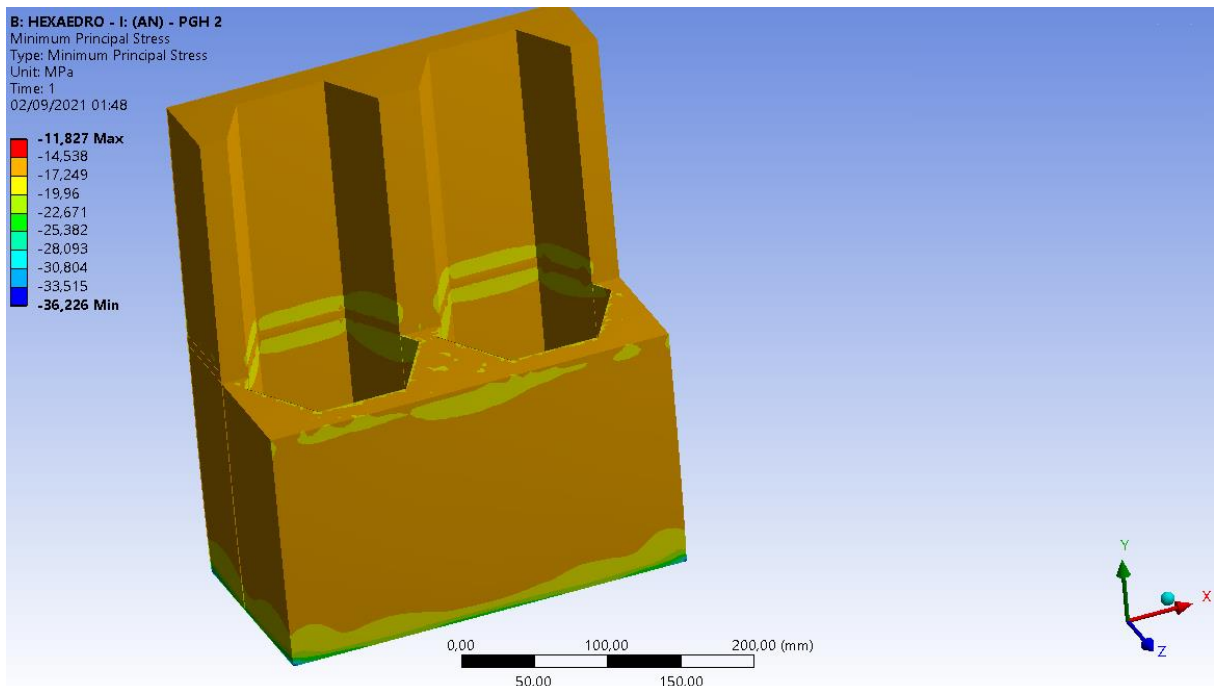
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



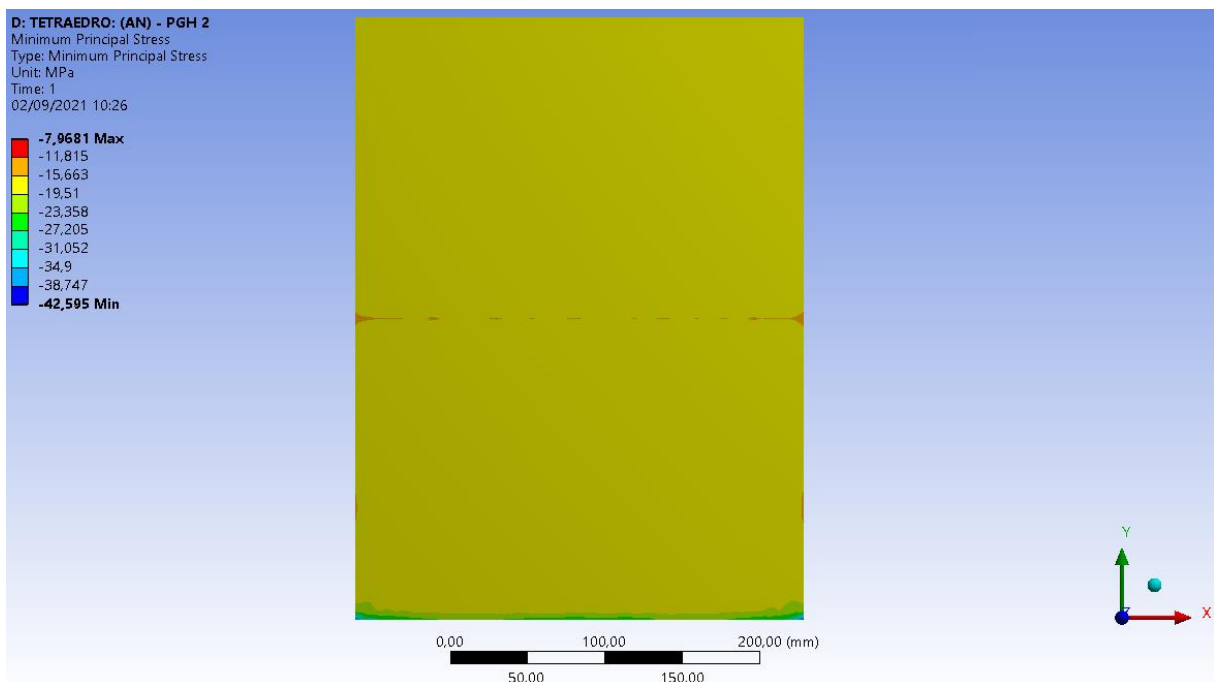
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



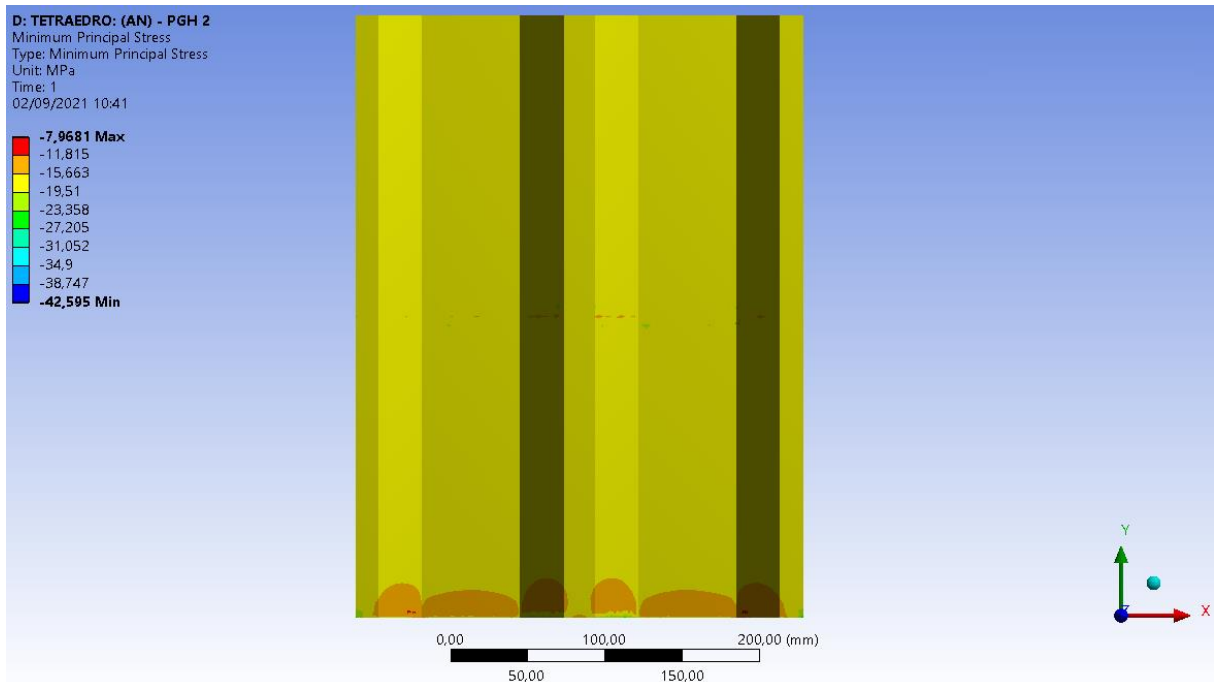
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



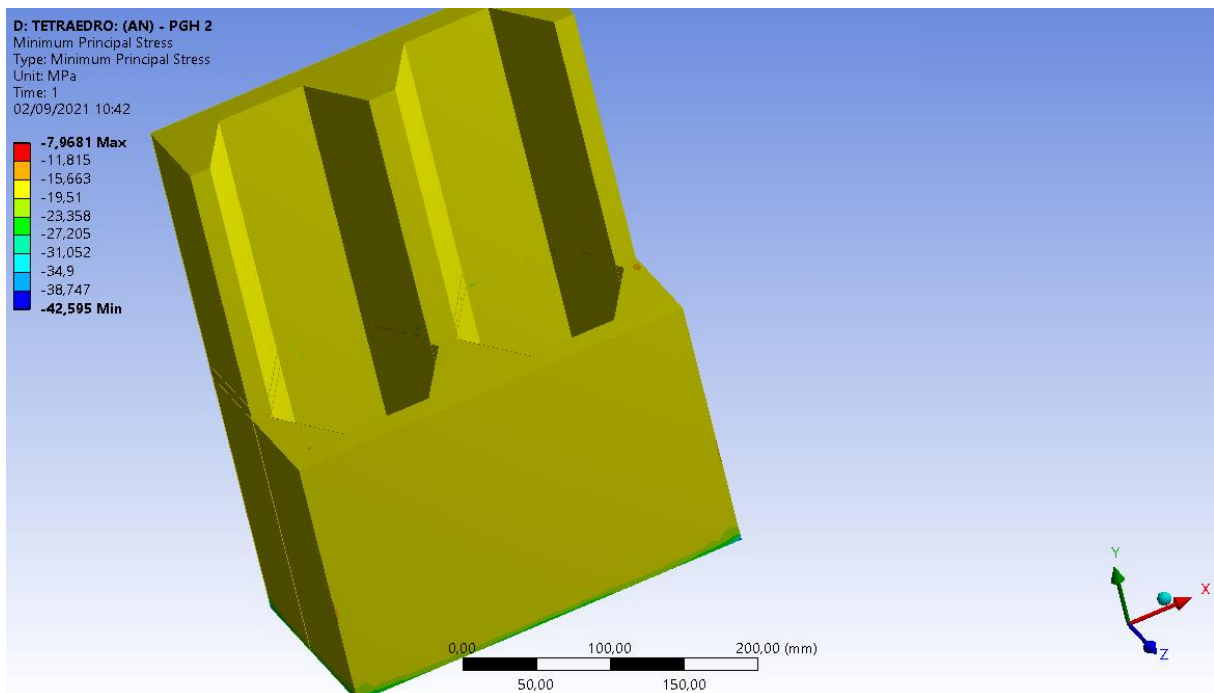
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



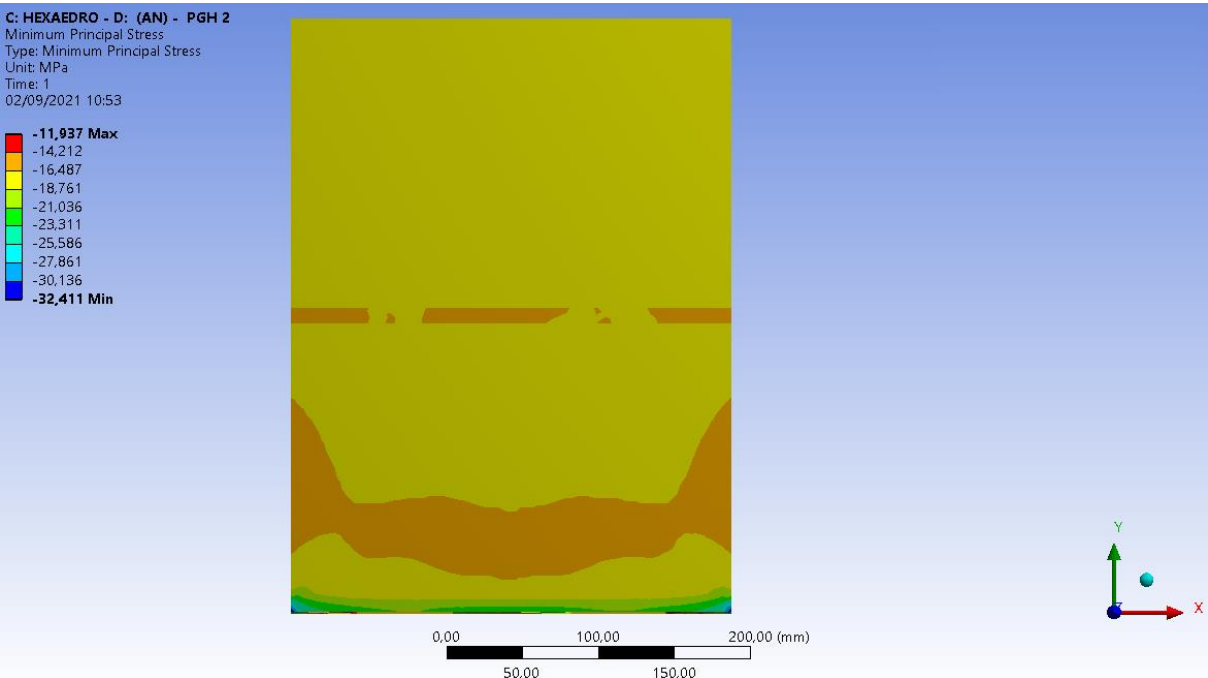
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



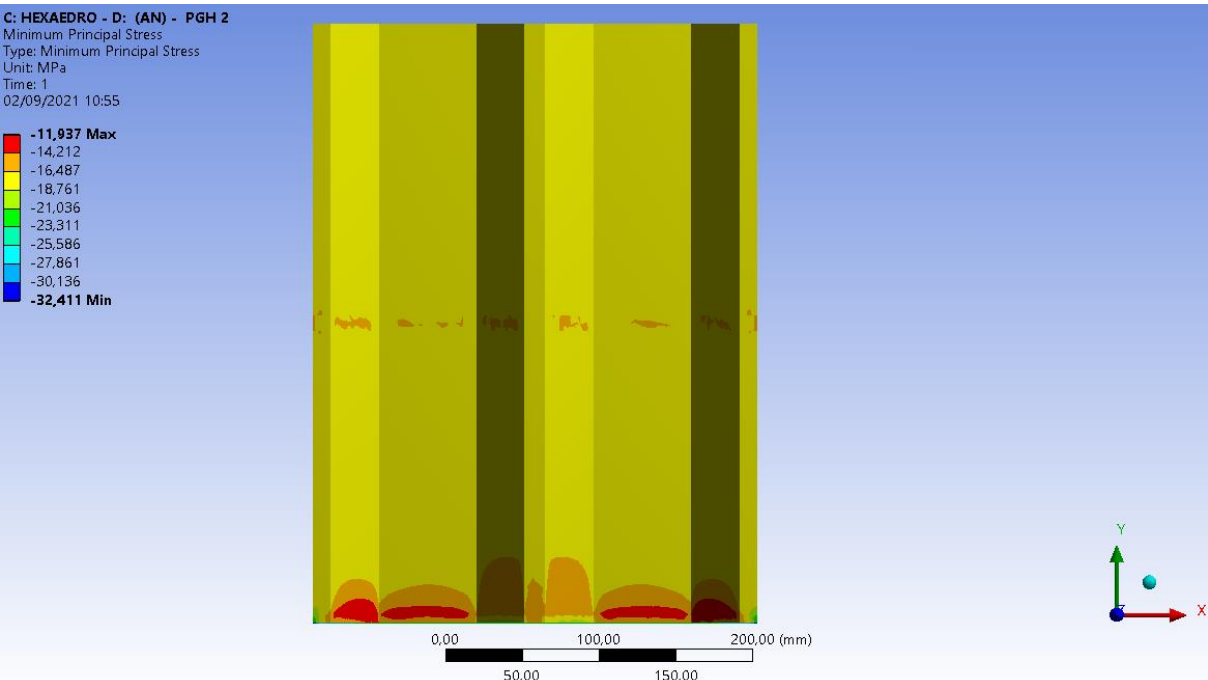
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



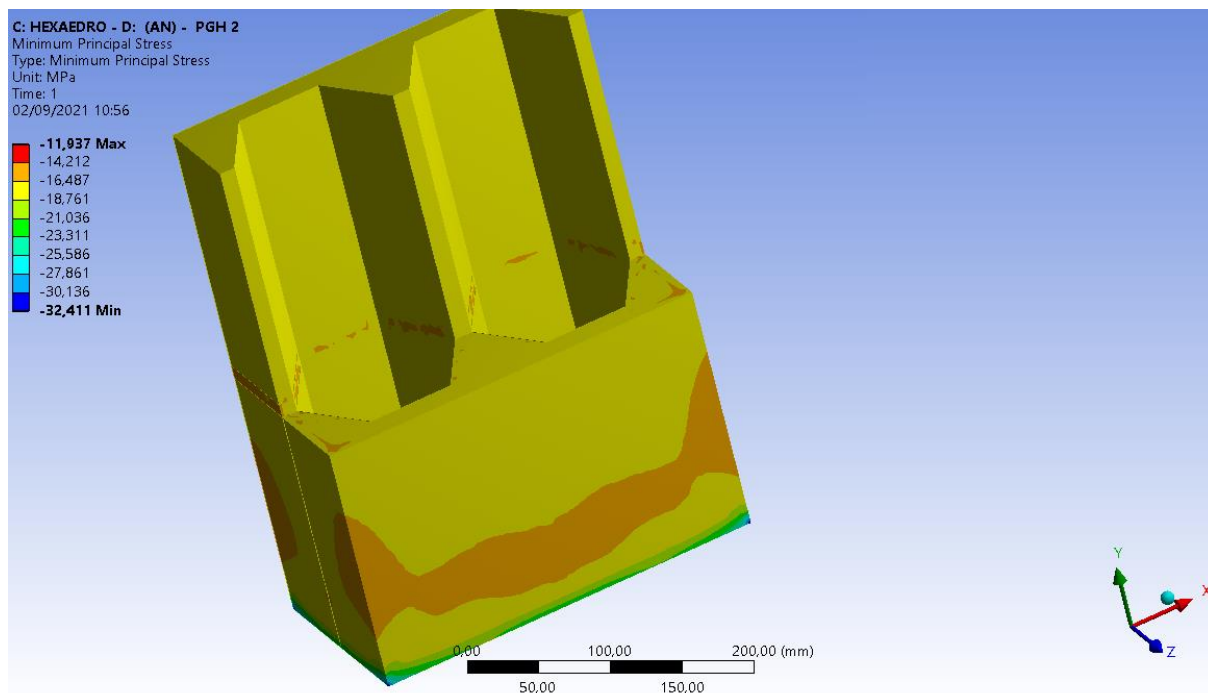
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



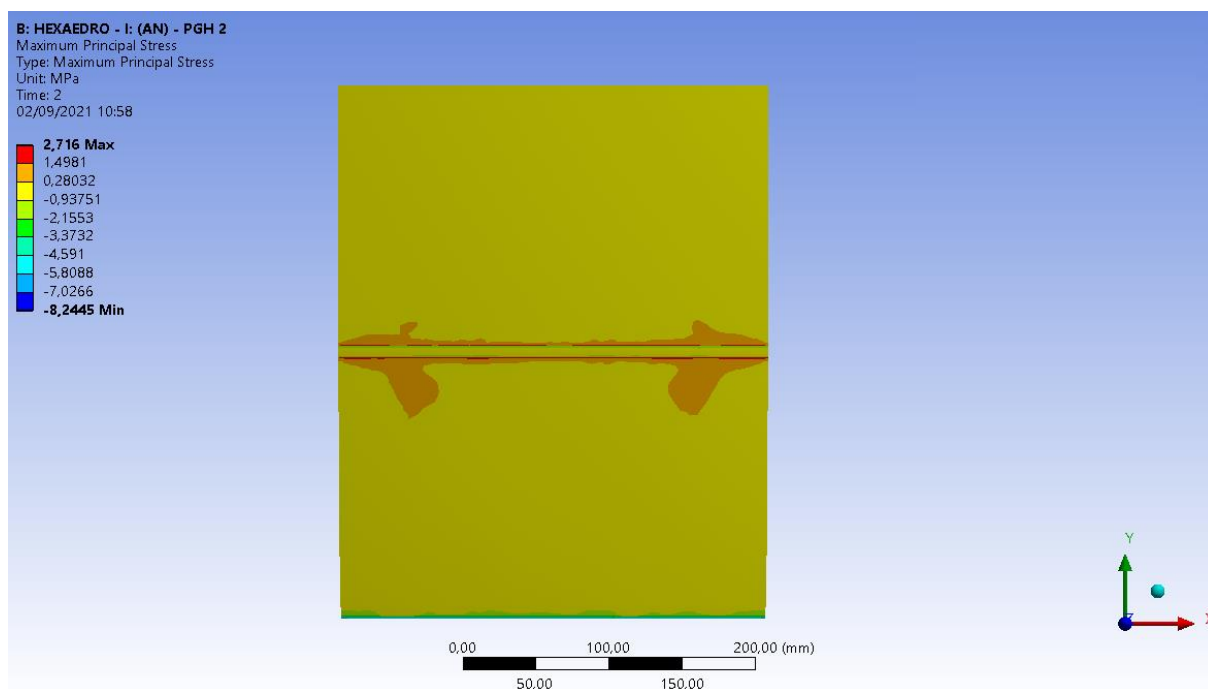
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



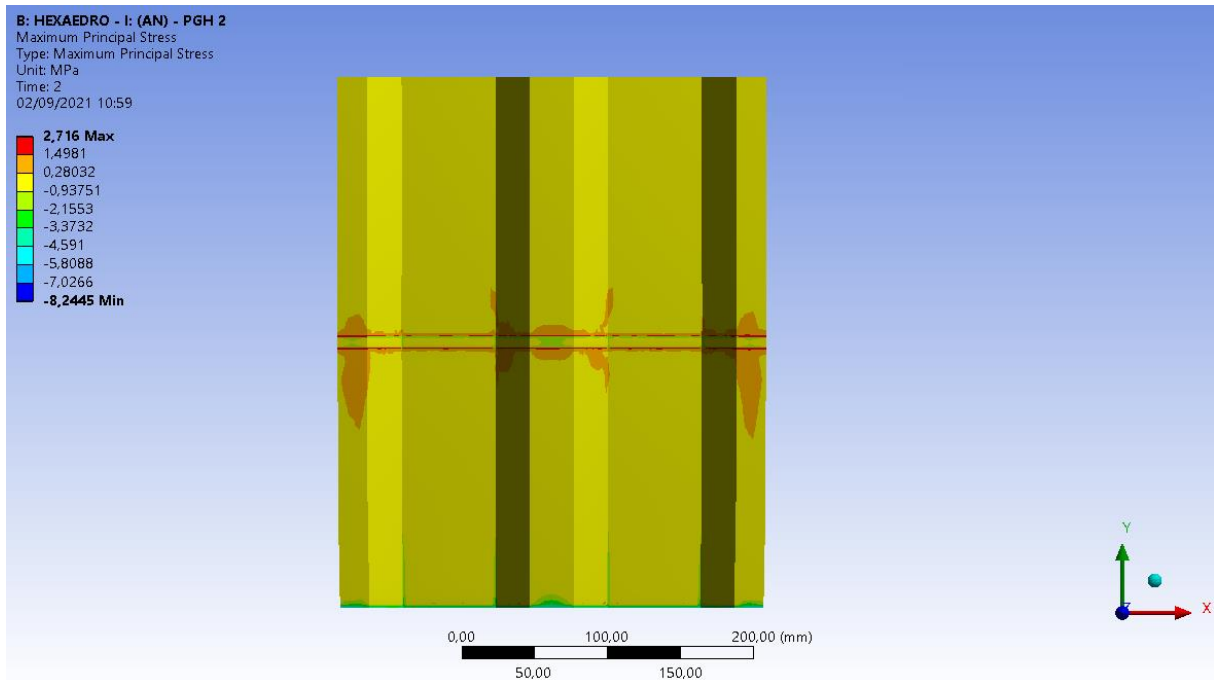
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



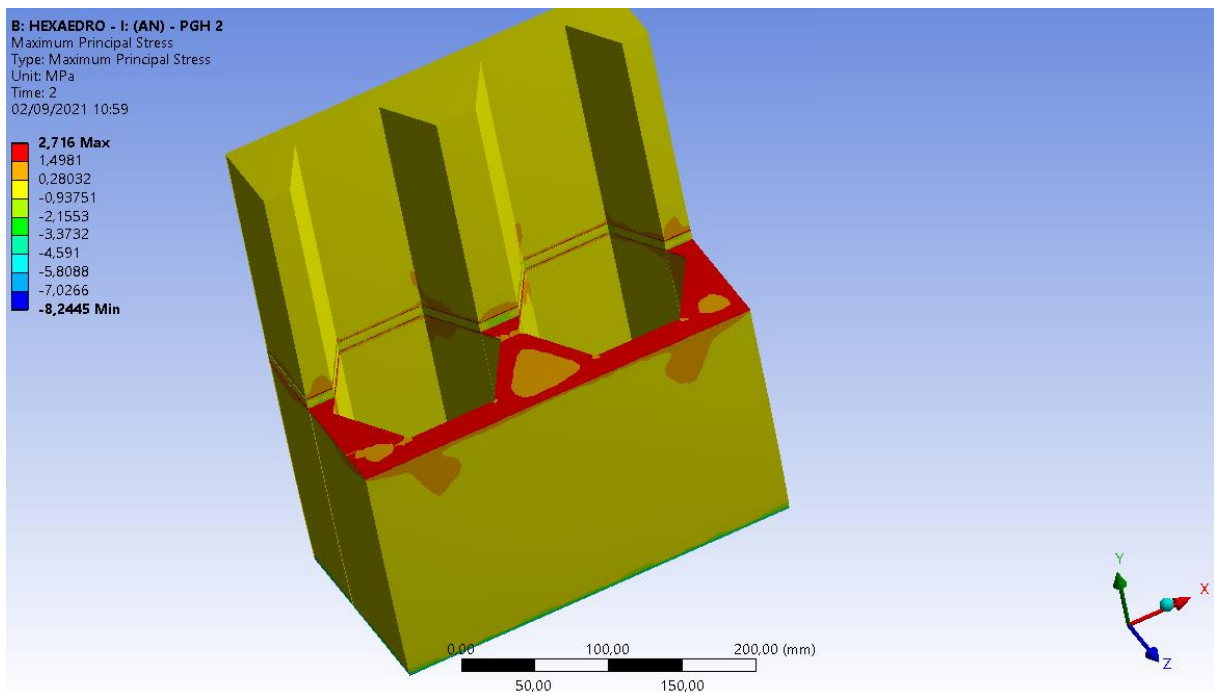
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



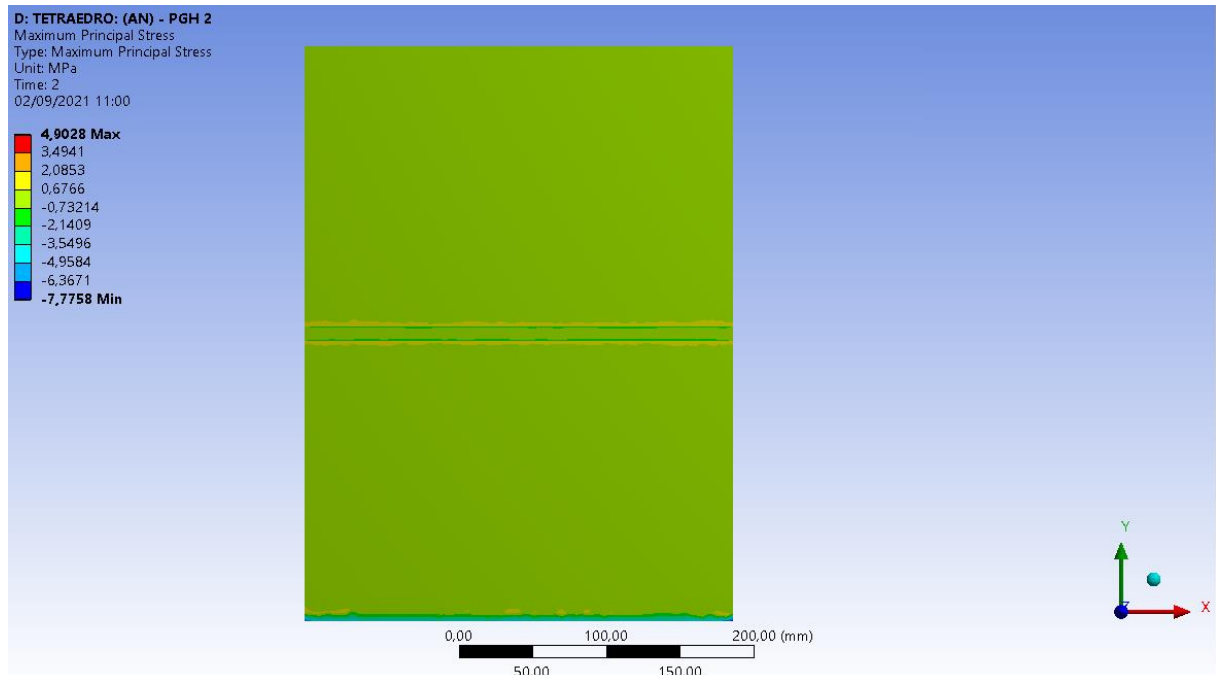
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGH 2



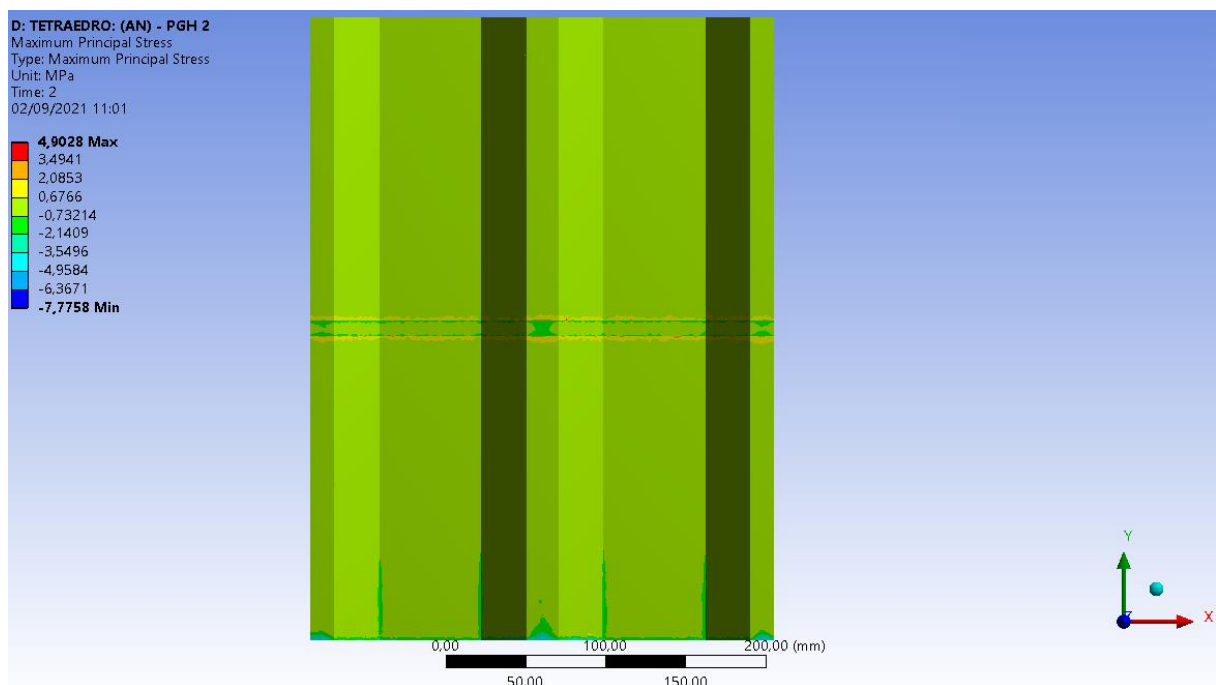
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



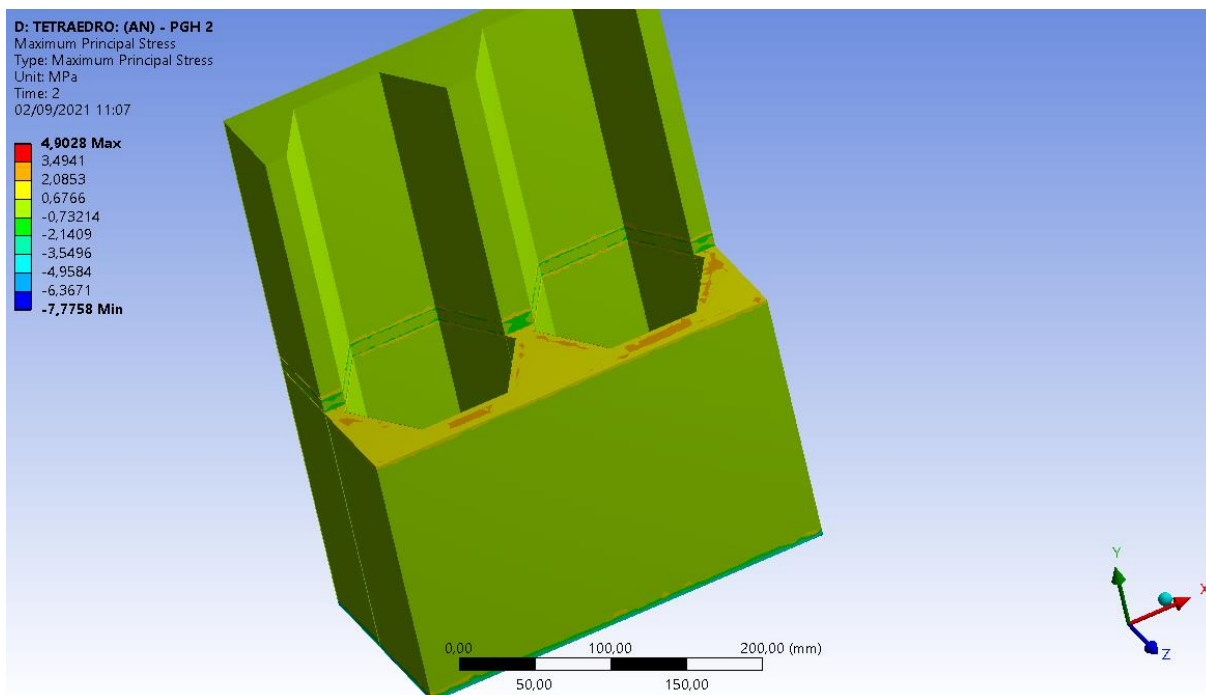
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



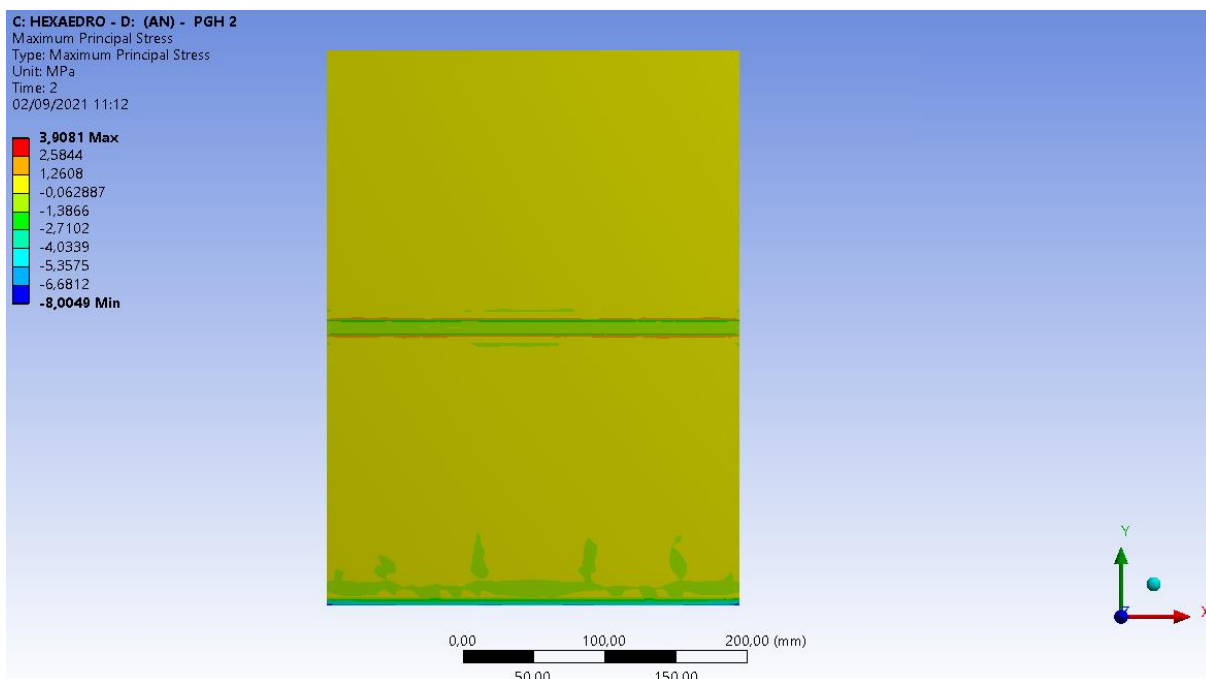
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGH 2



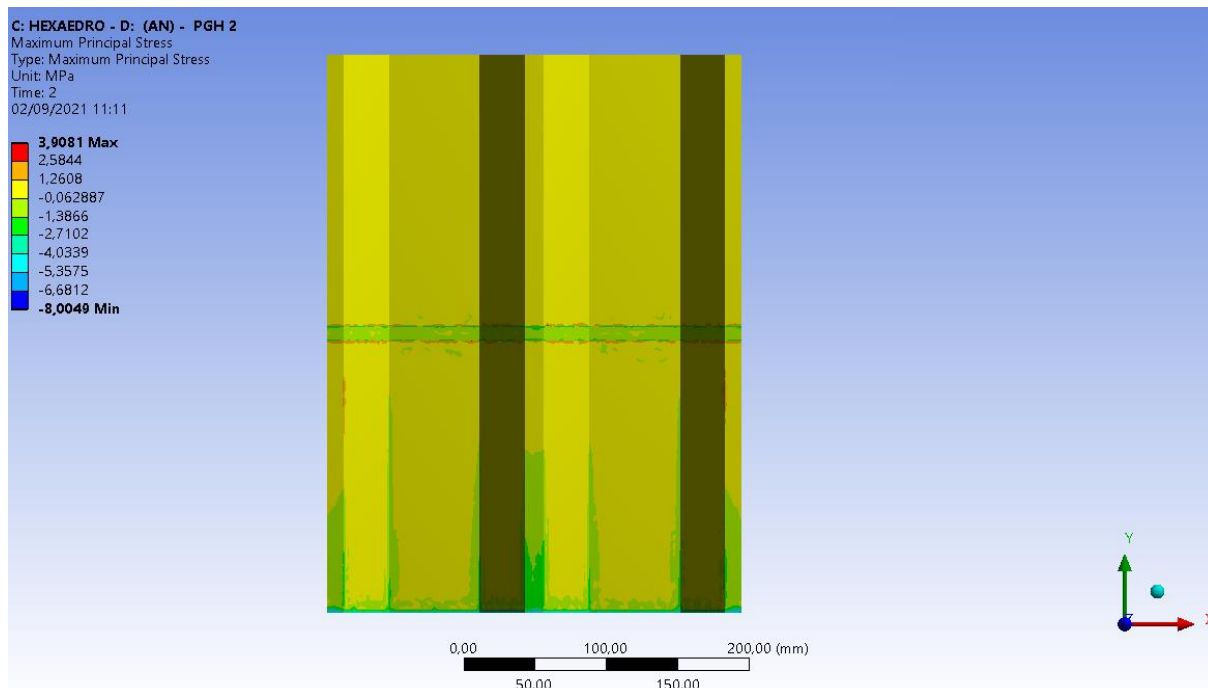
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



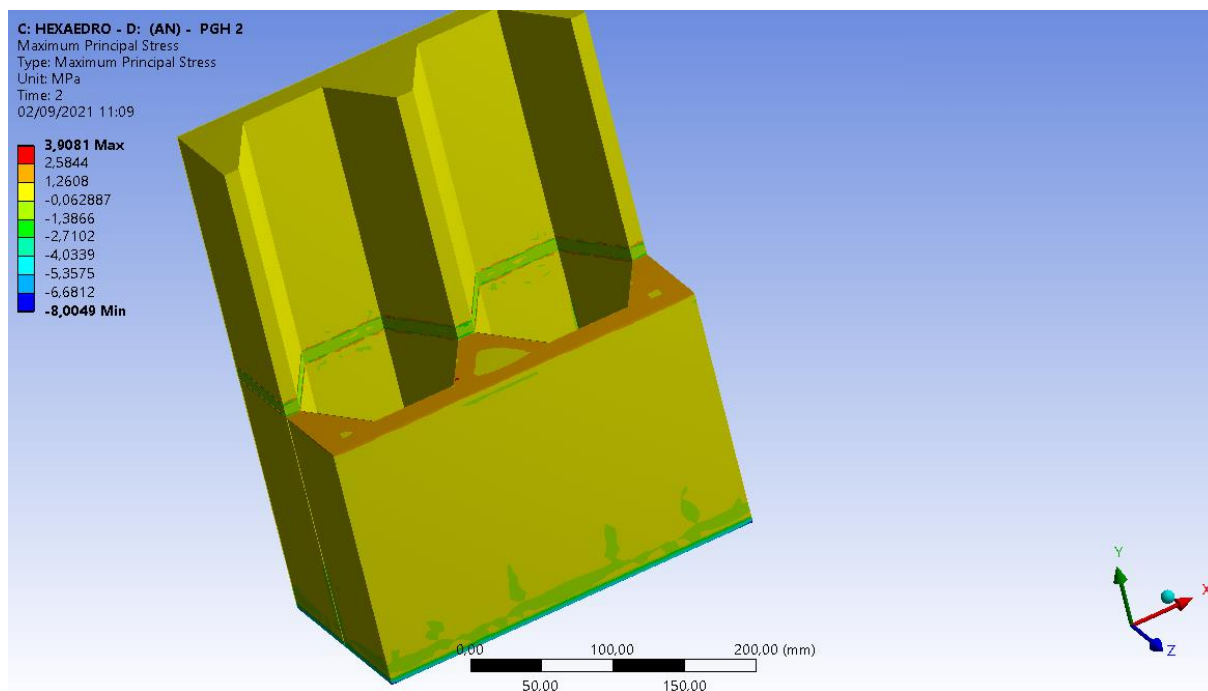
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



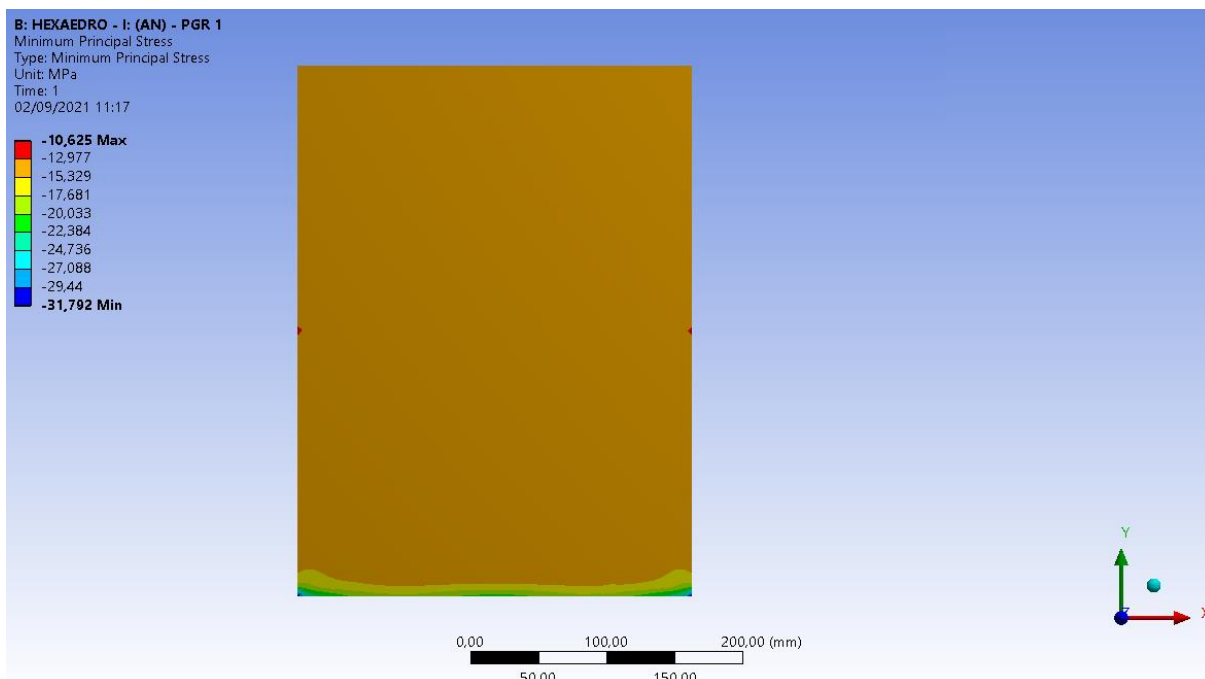
Fonte: Próprio autor

Figura B.4.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGH 2



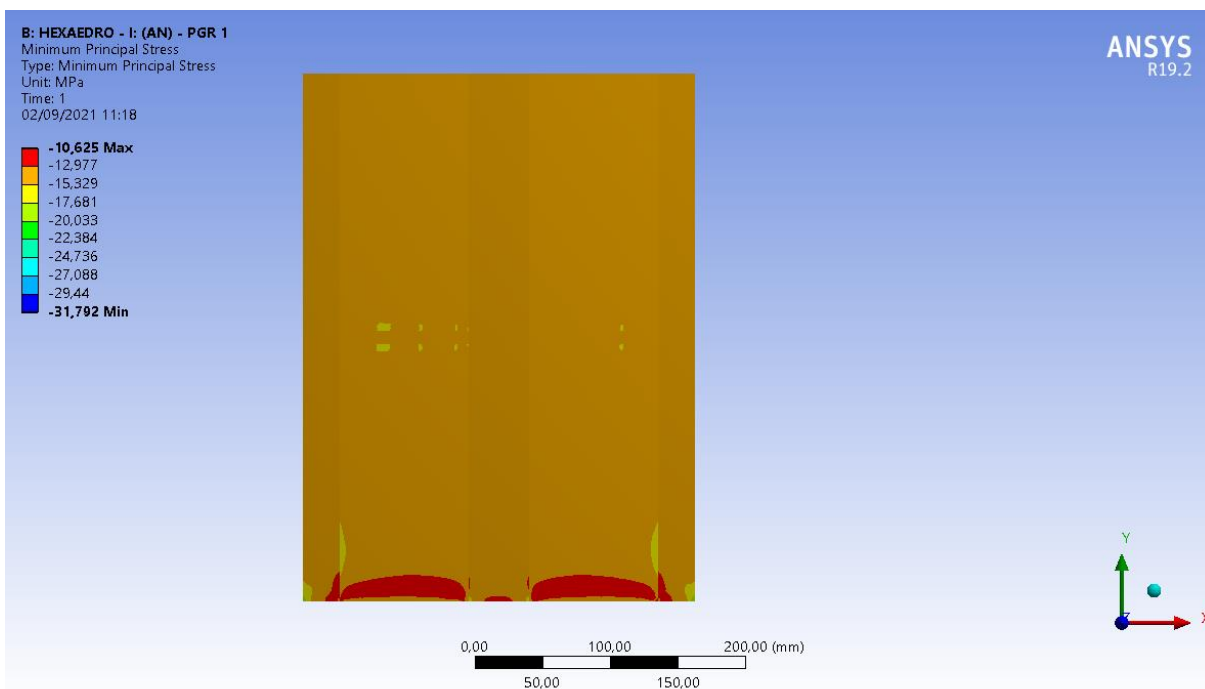
Fonte: Próprio autor

Figura B.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



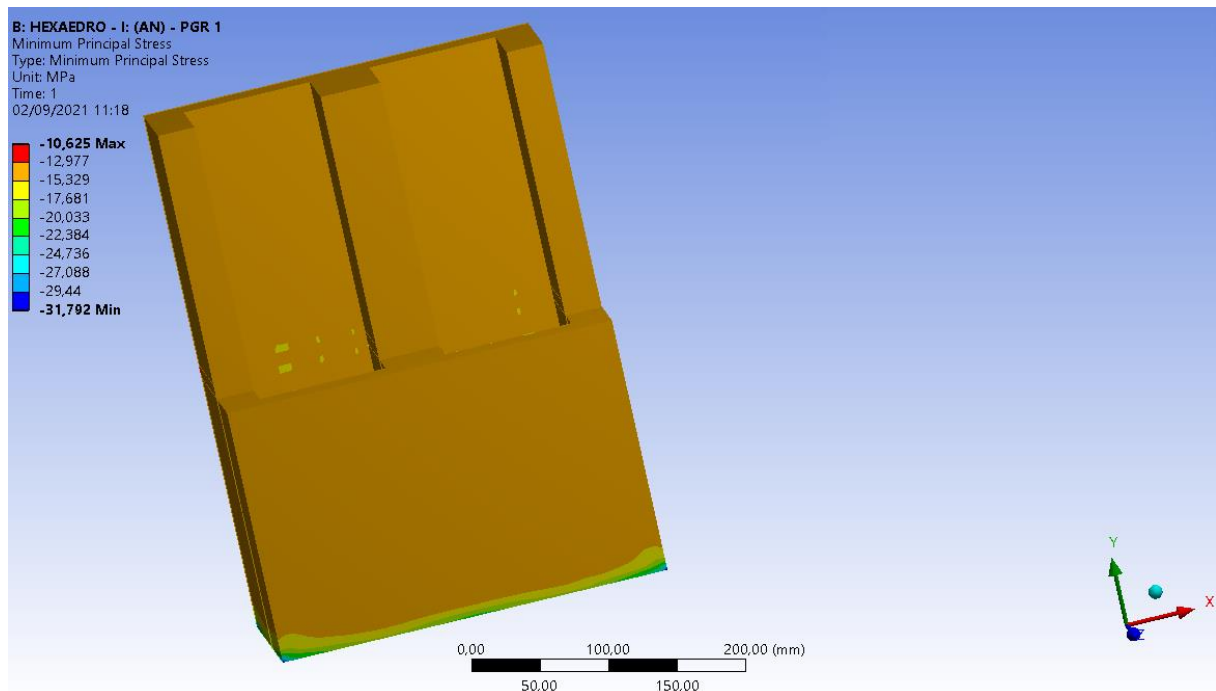
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



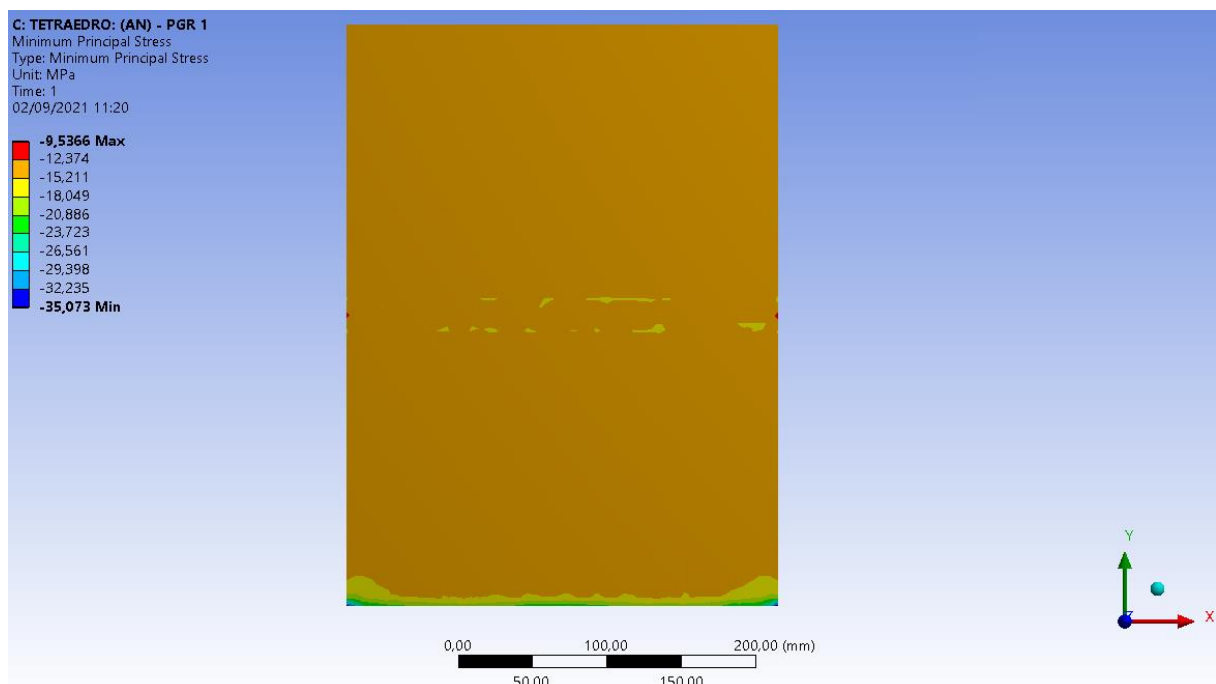
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



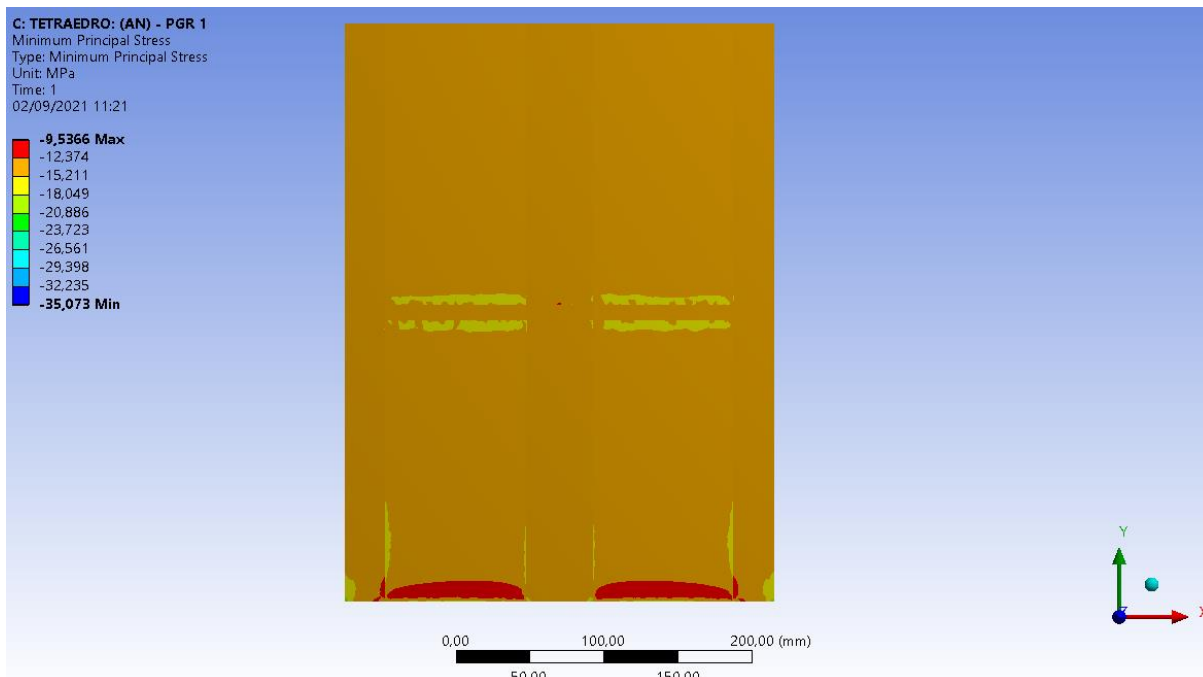
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



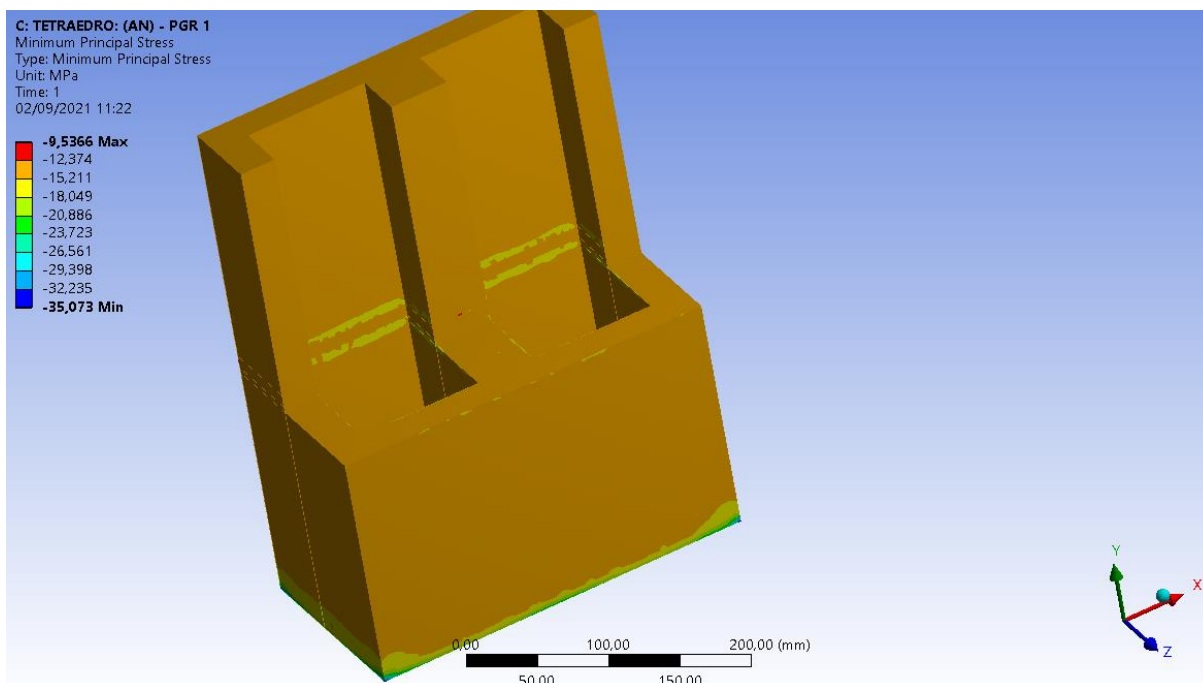
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



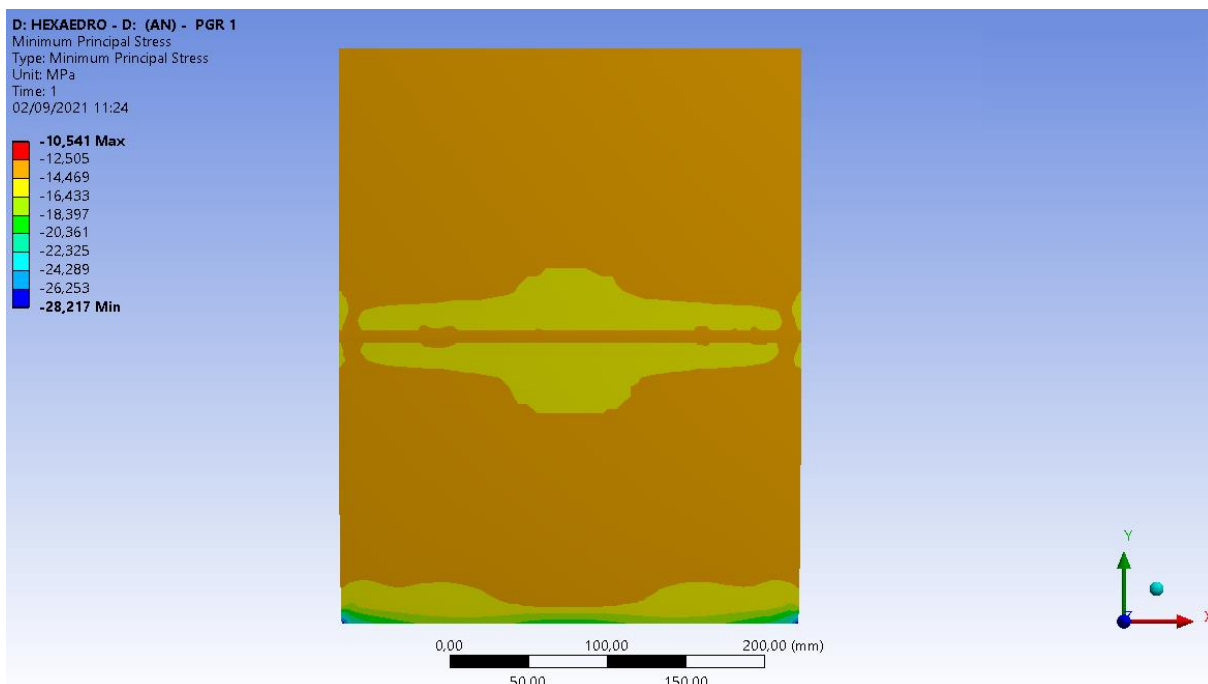
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



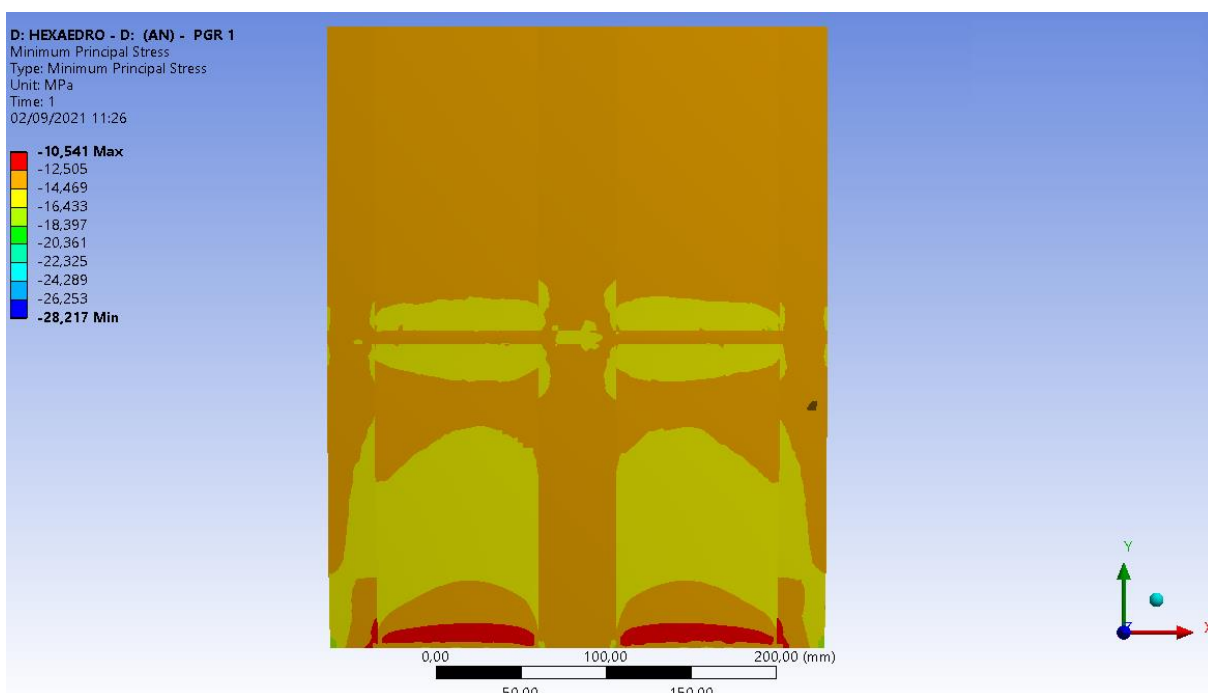
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



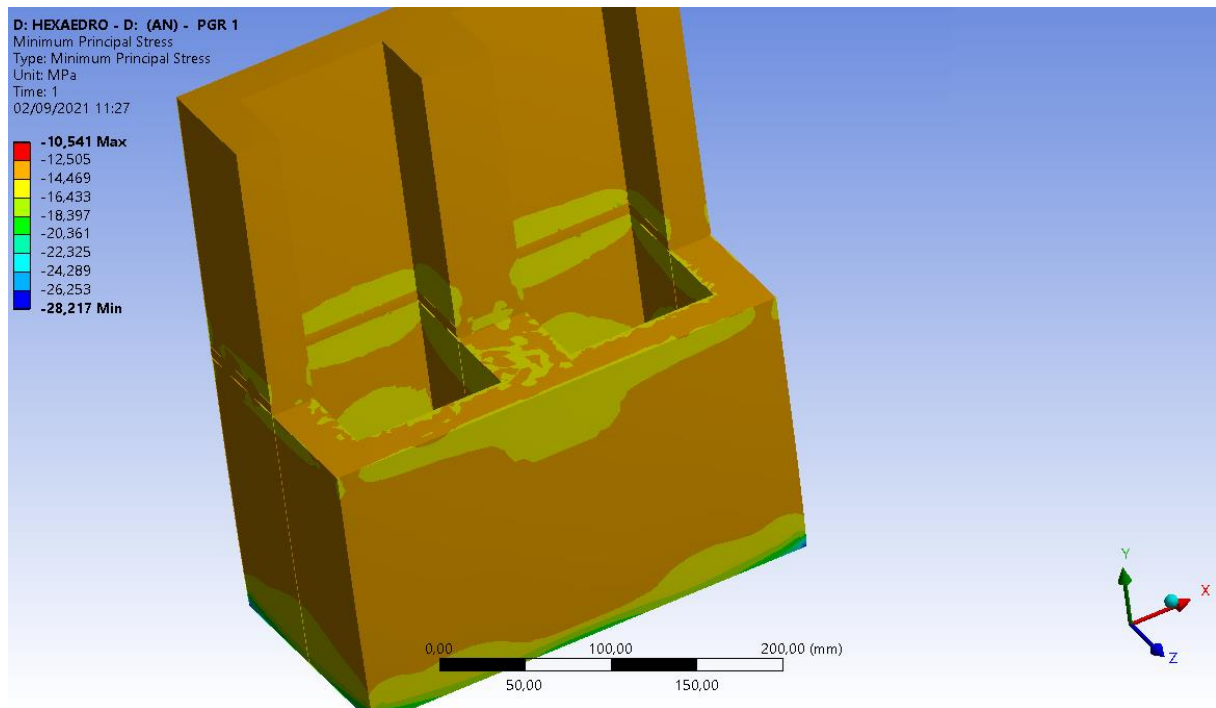
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



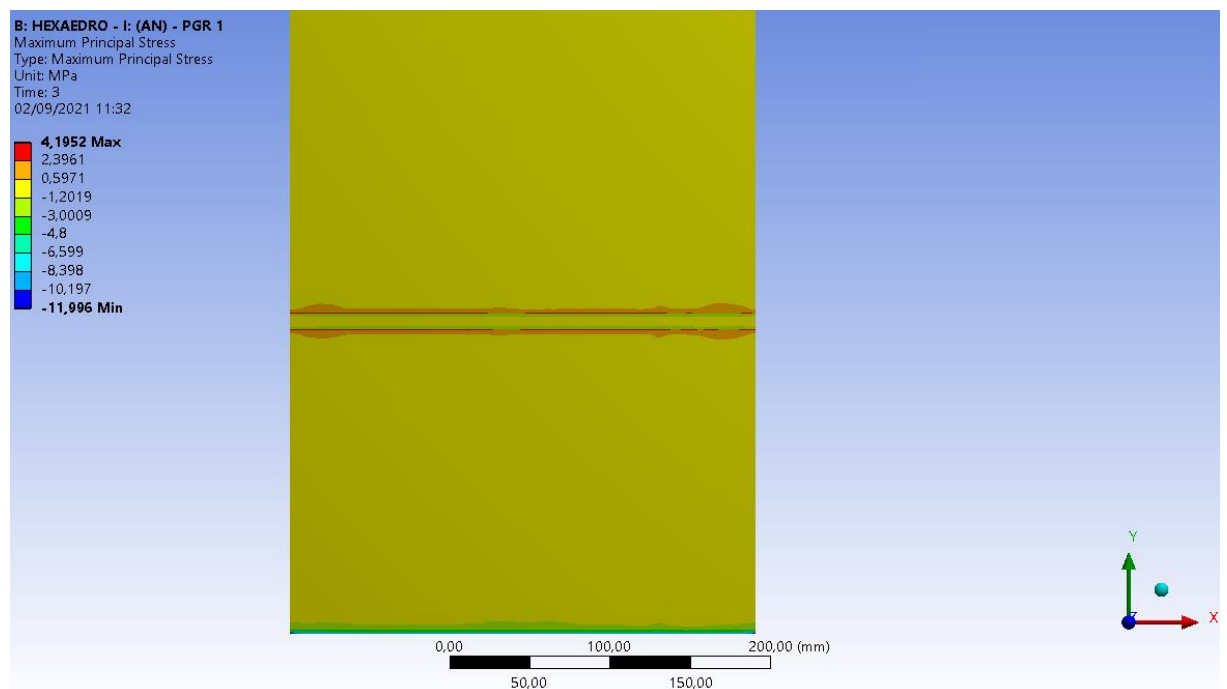
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



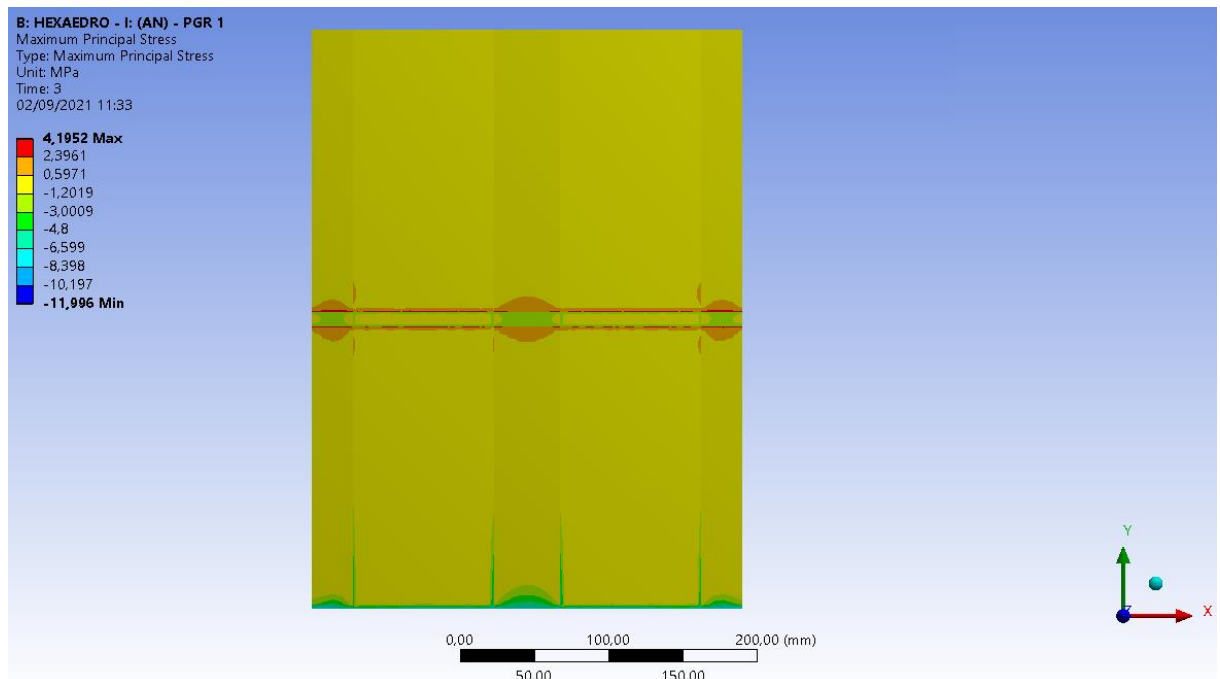
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



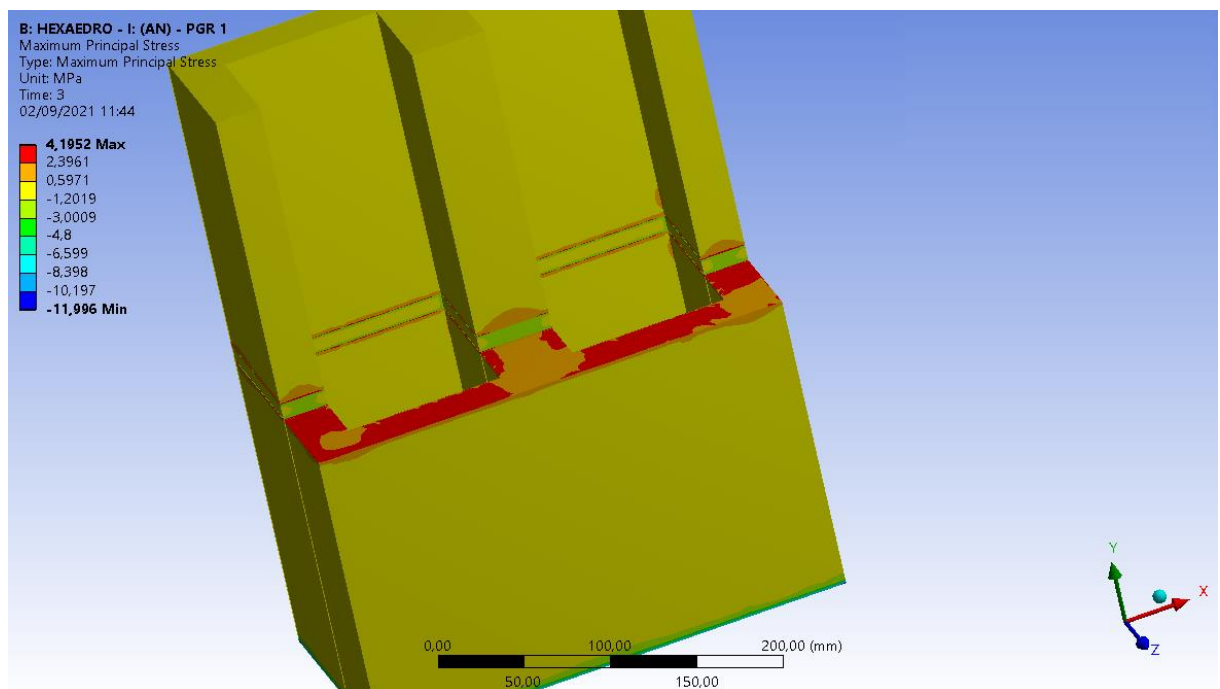
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



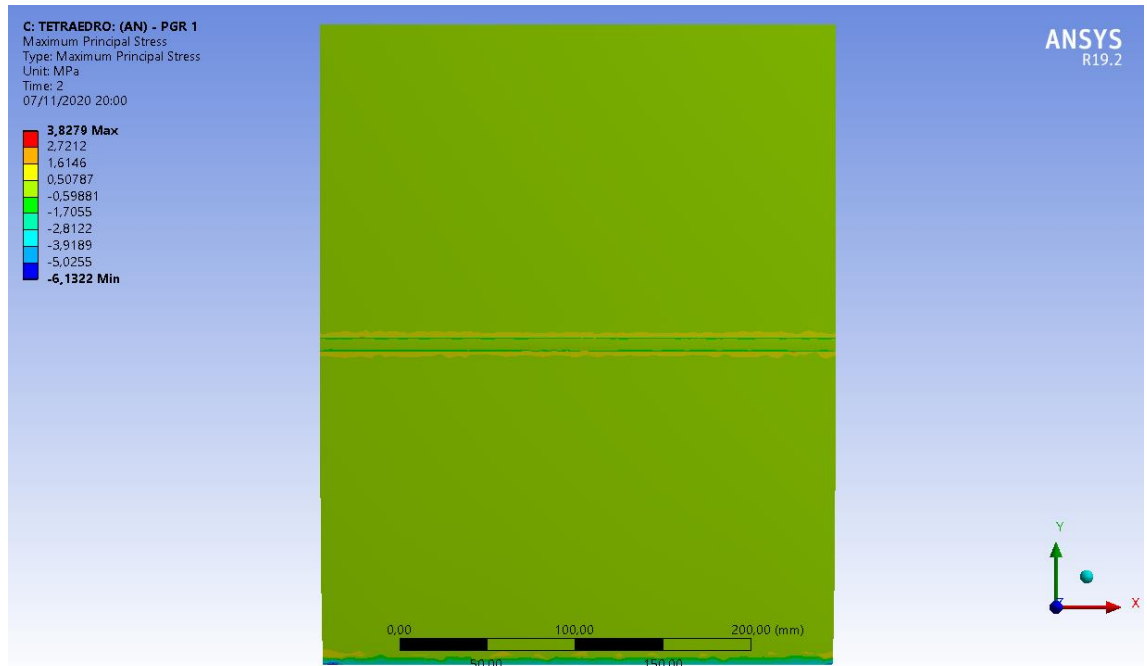
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 1



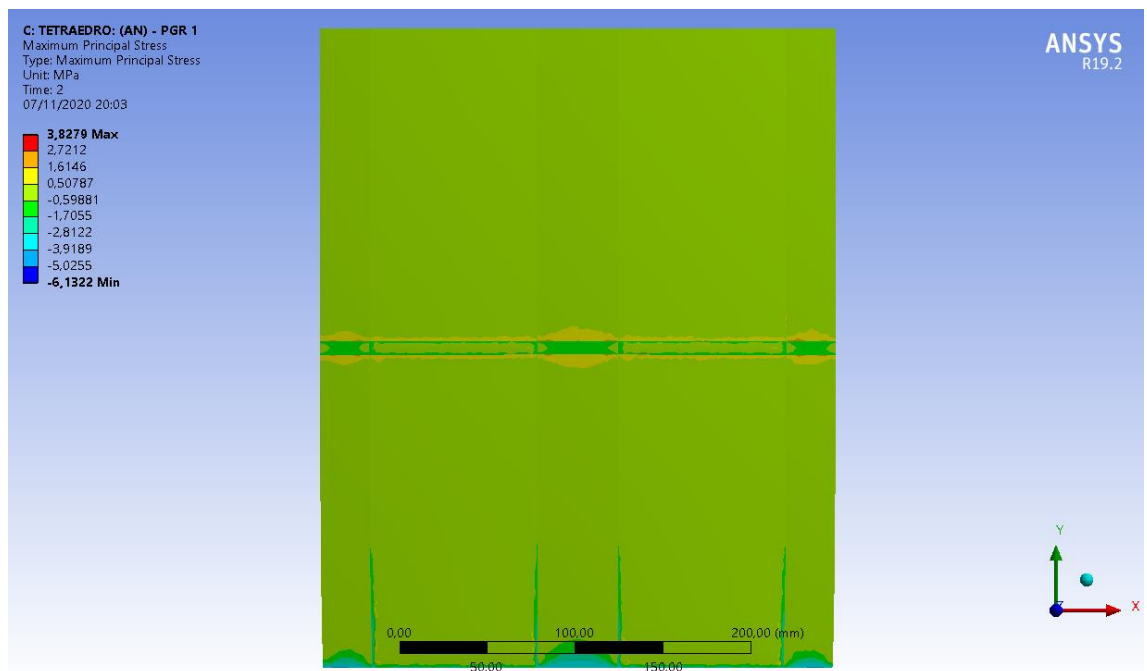
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



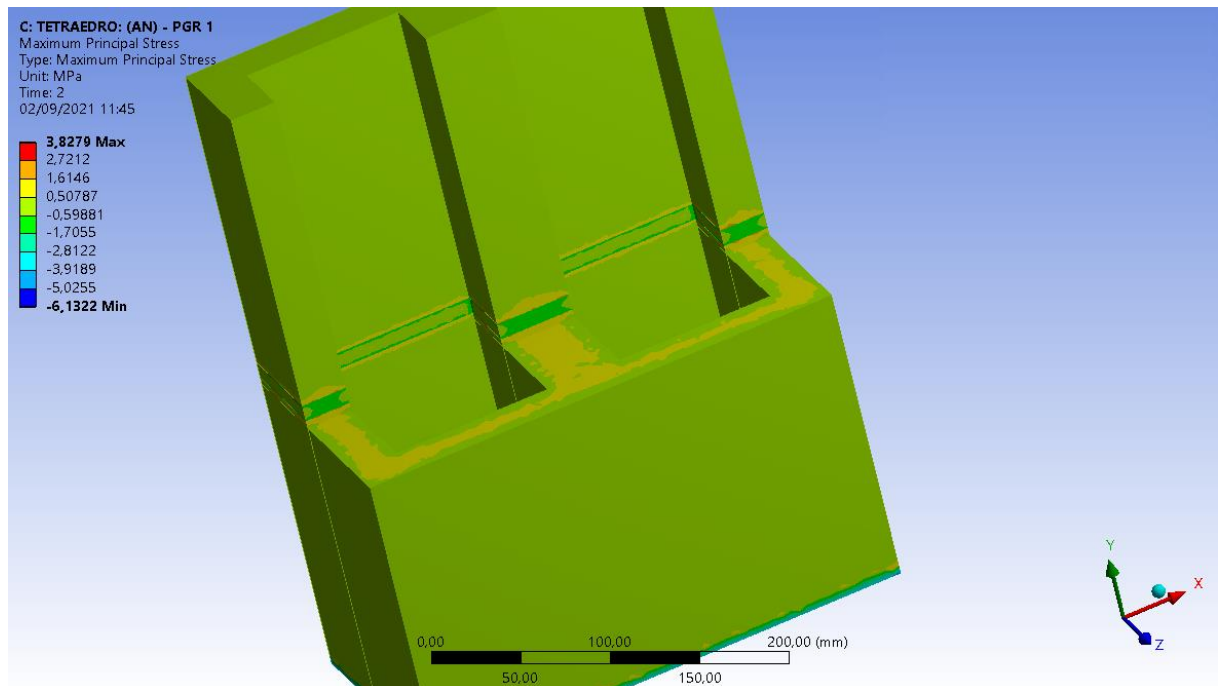
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



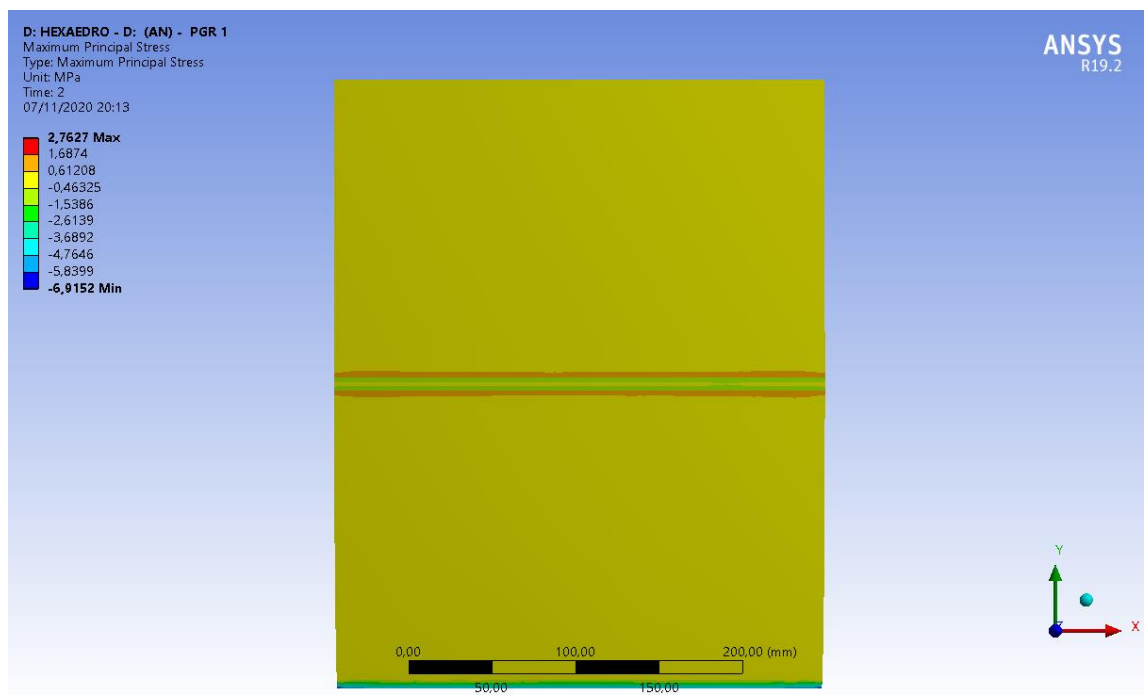
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 1



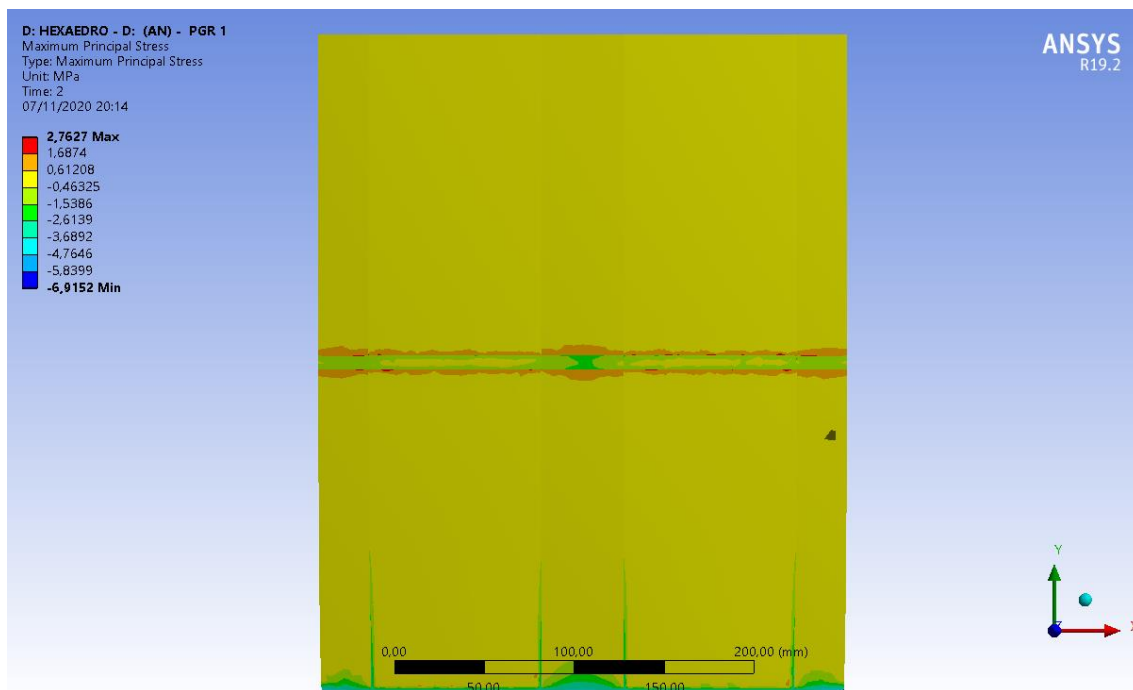
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



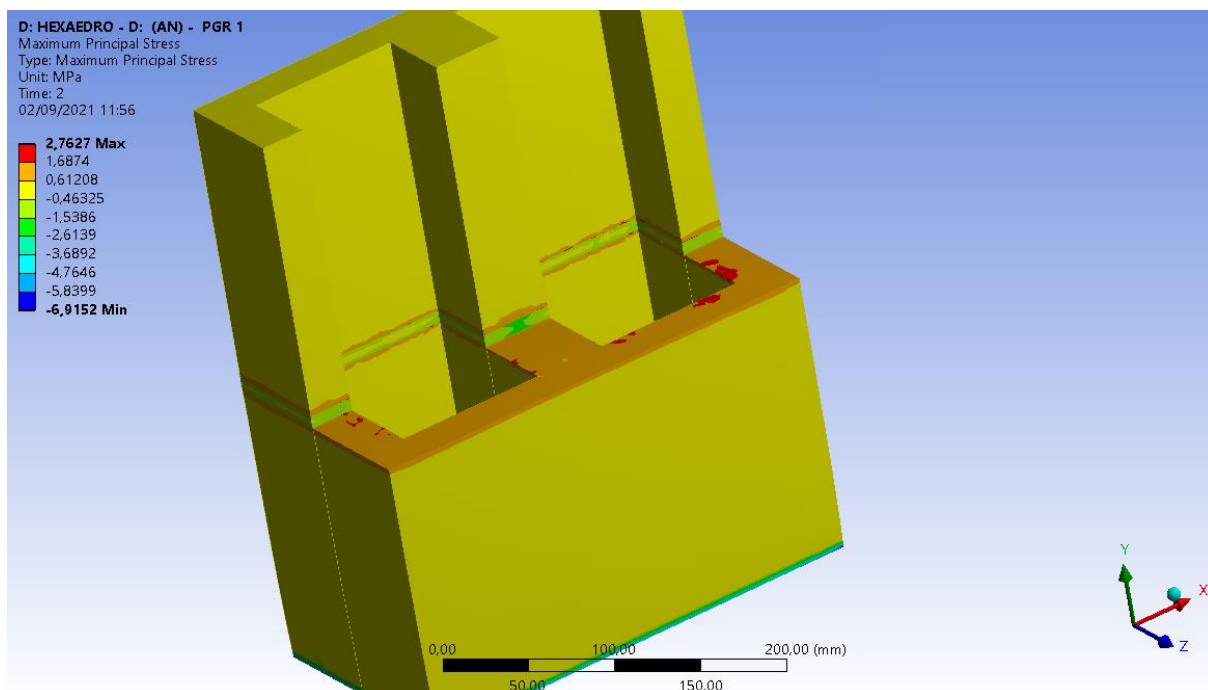
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



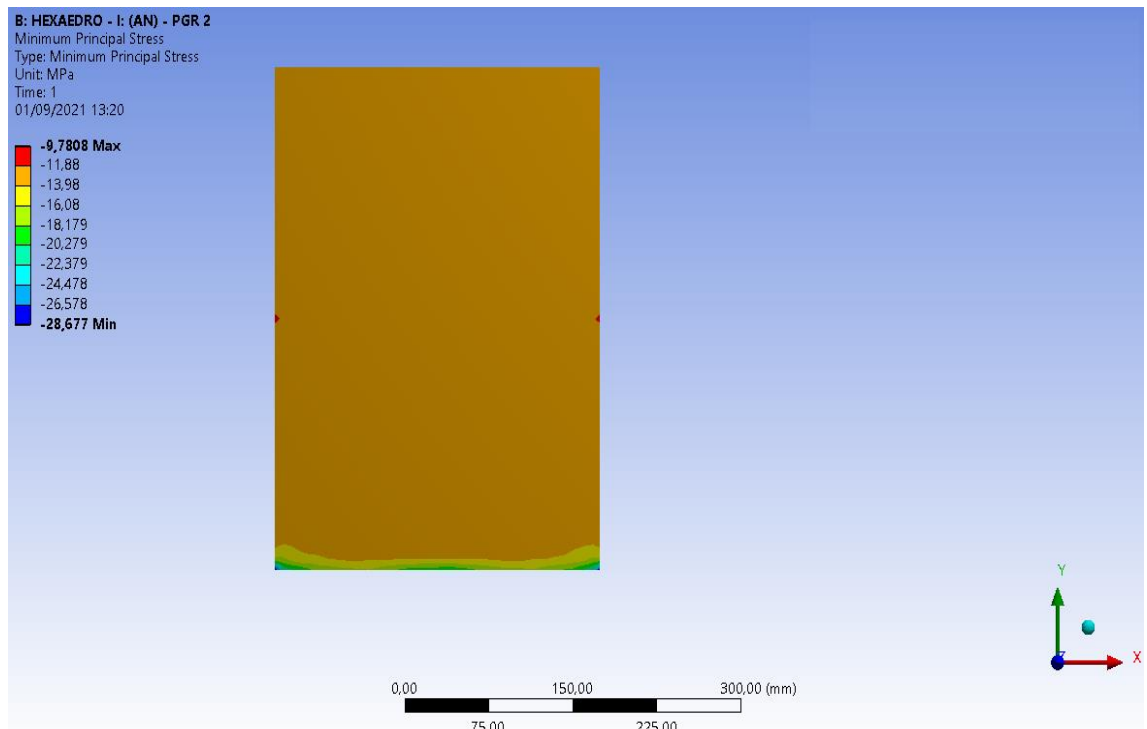
Fonte: Próprio autor

Figura B.5.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 1



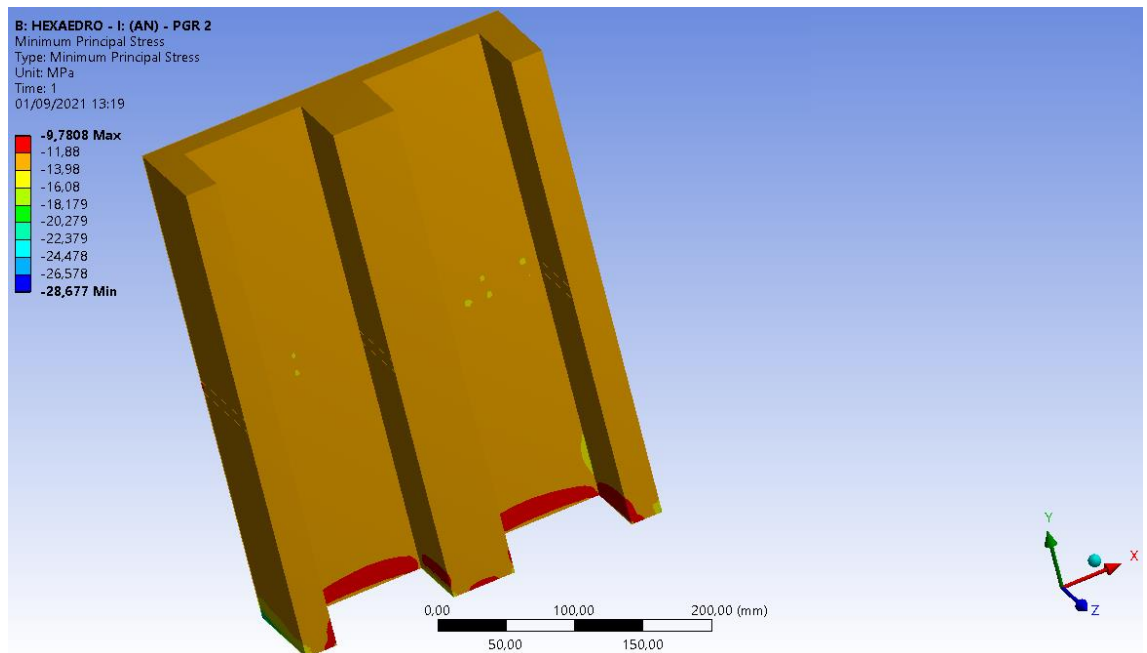
Fonte: Próprio autor

Figura B.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



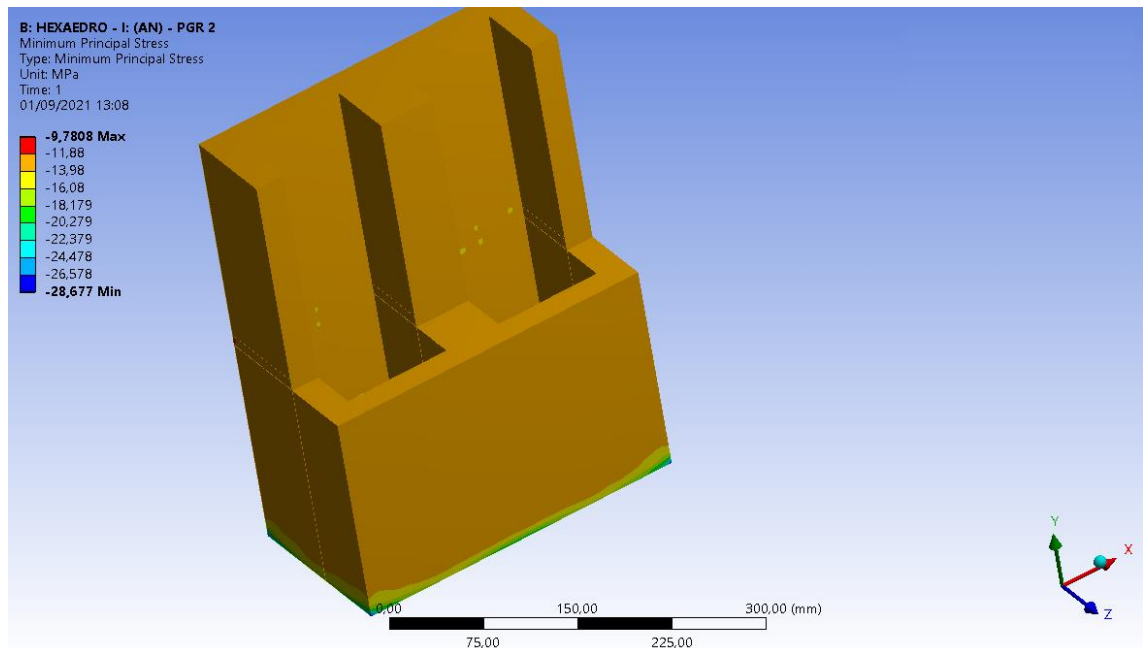
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.1 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



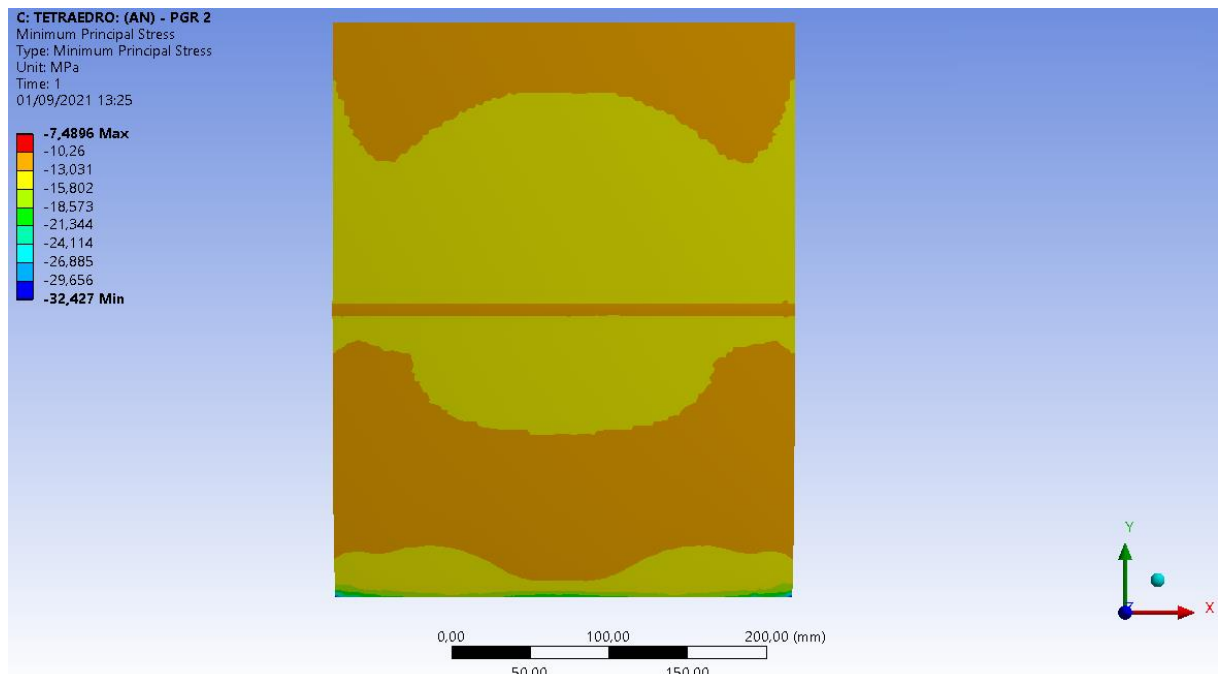
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.2 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



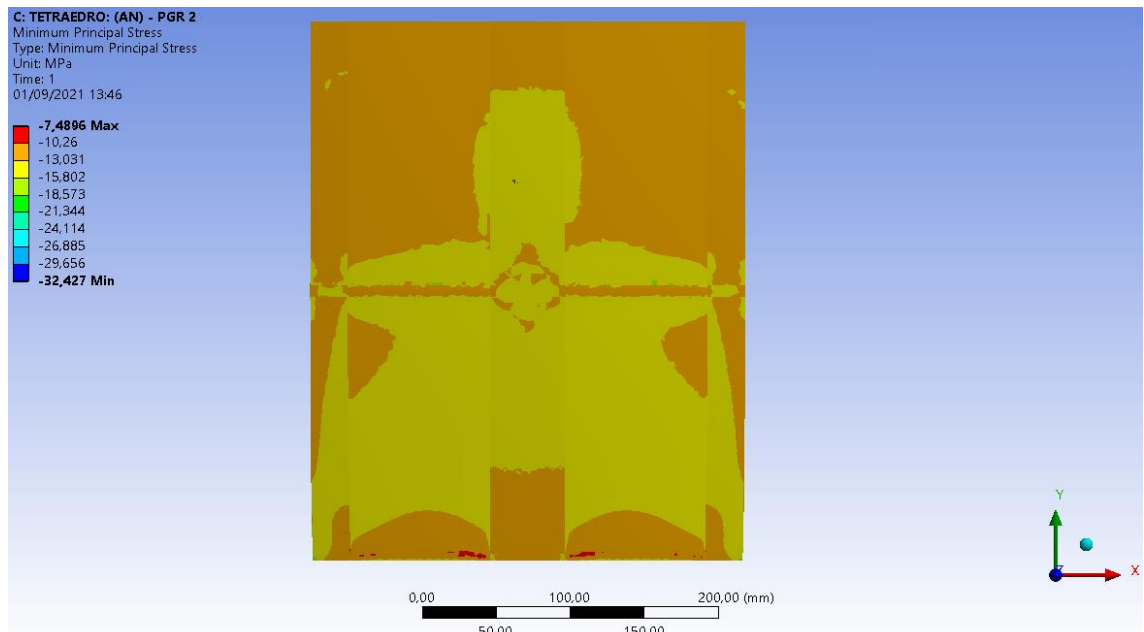
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.3 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



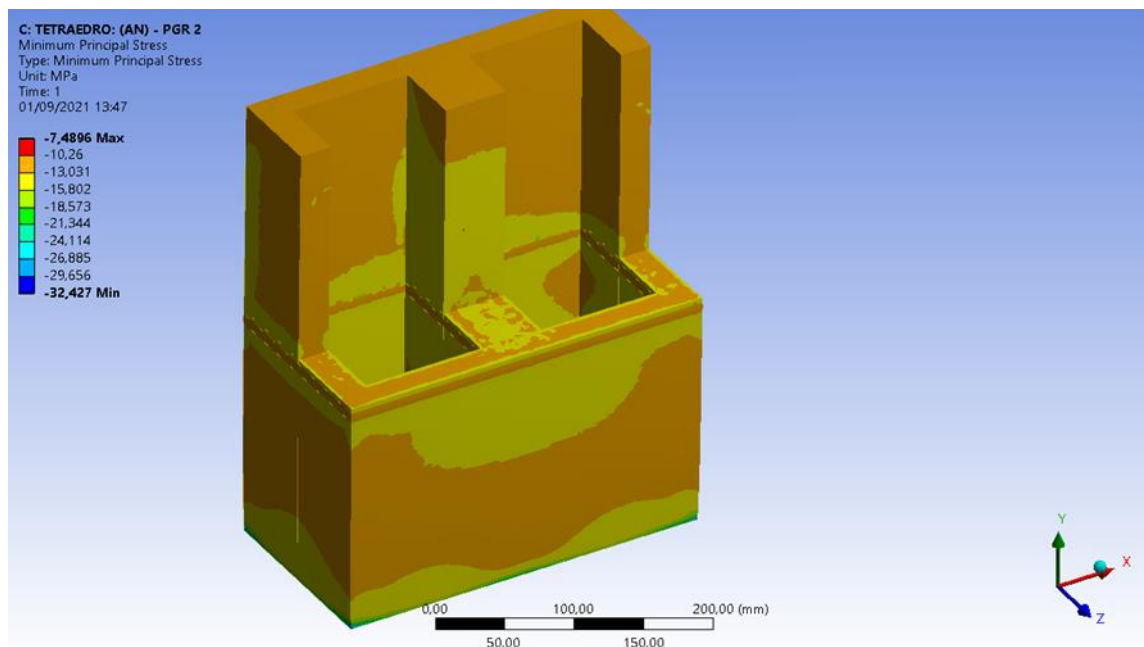
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.4 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



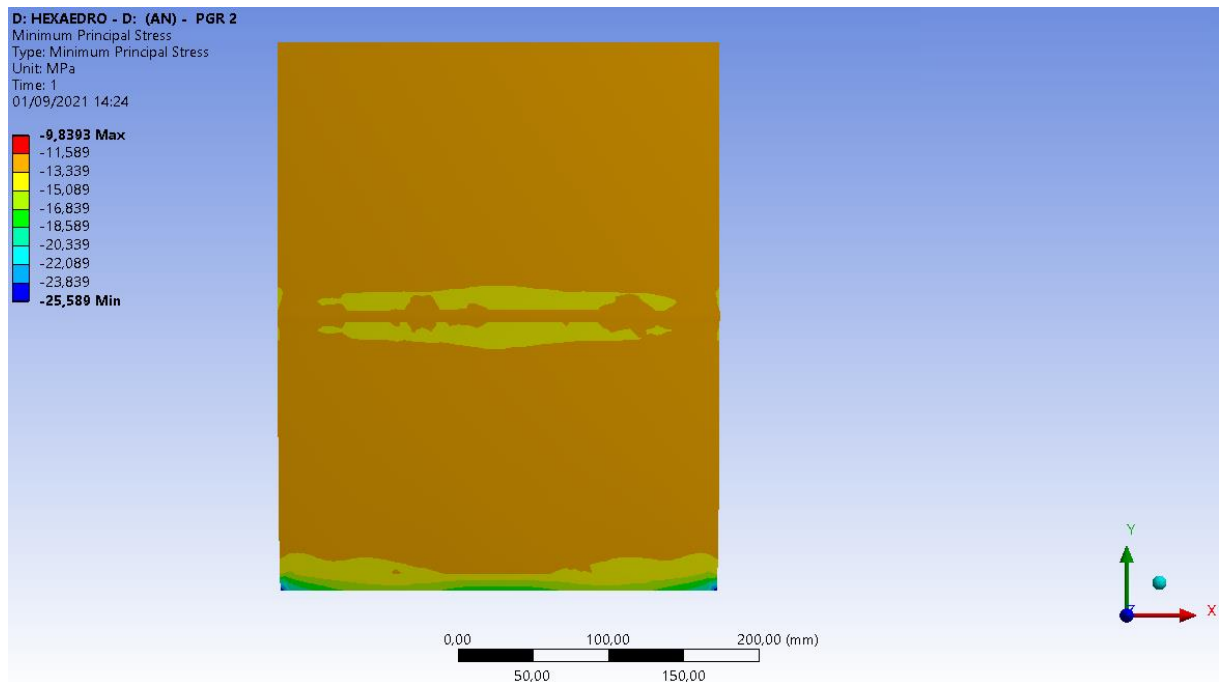
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.5 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



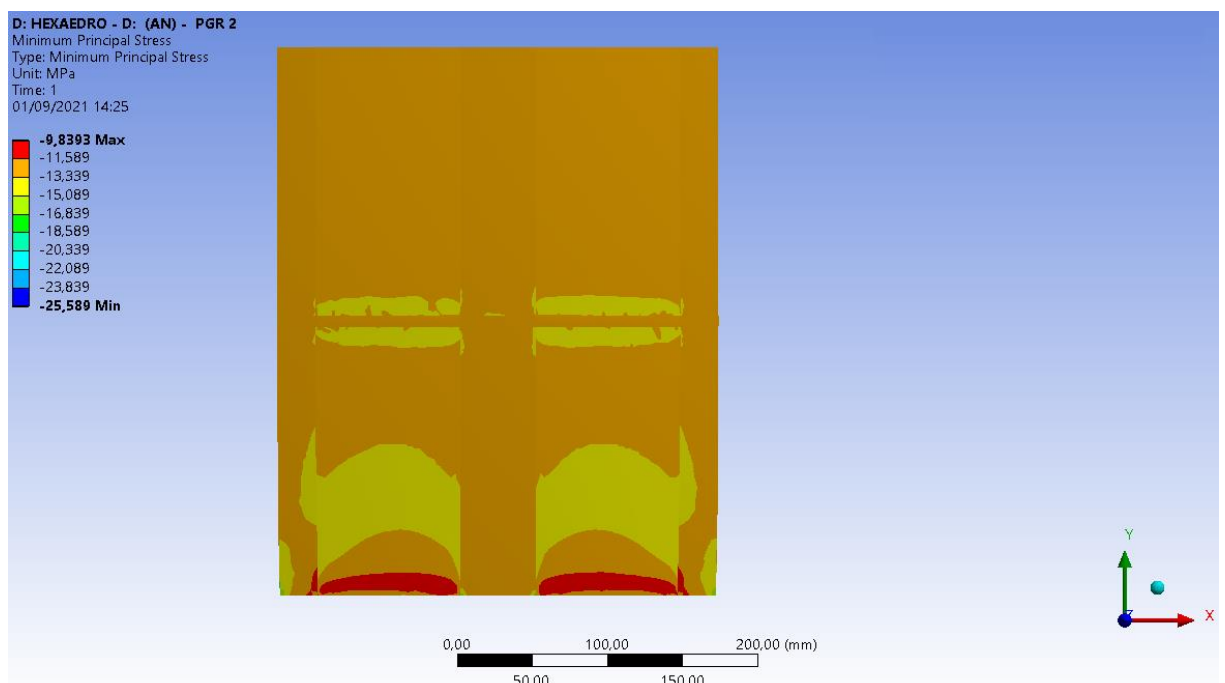
Fonte: Próprio autor

Figura B. 6.6 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



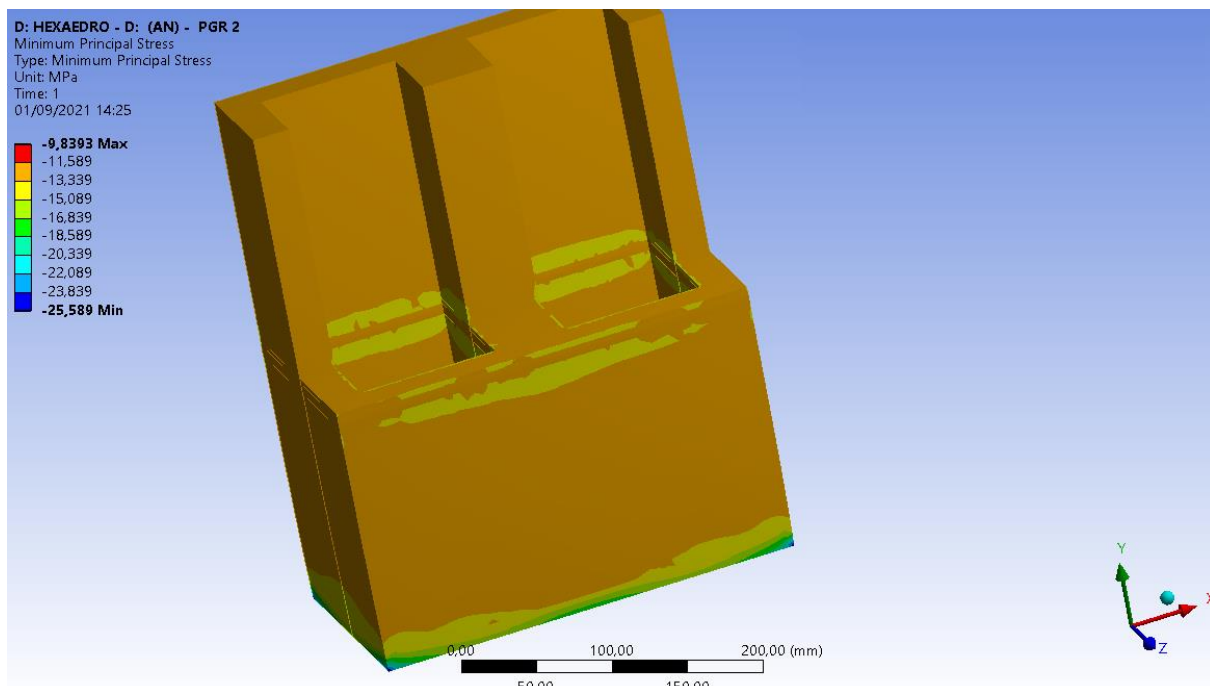
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.7 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



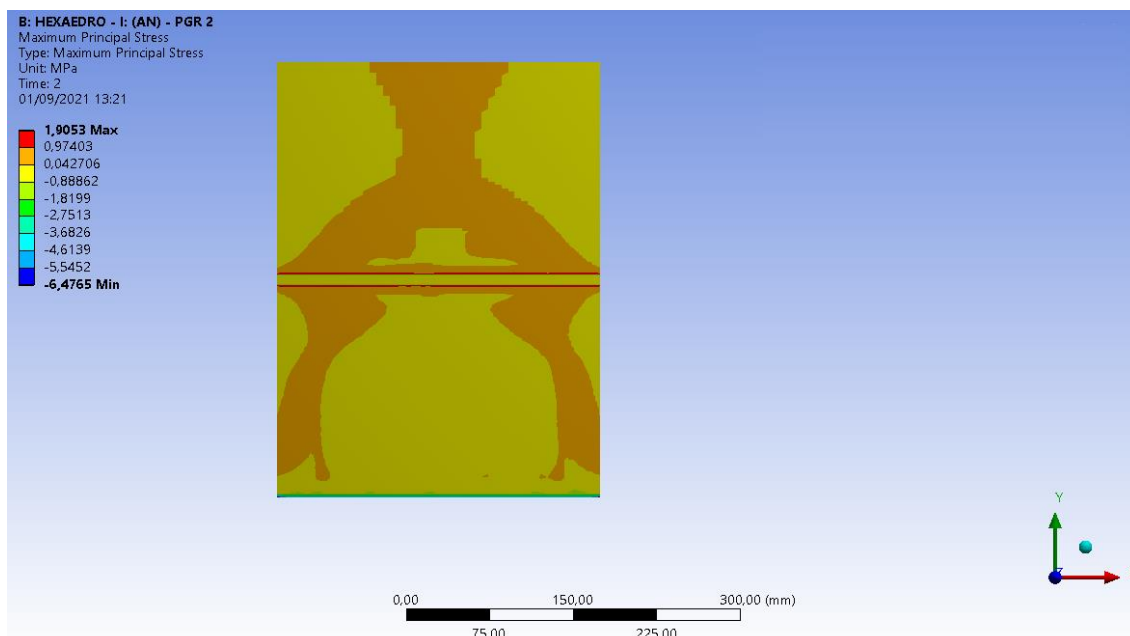
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.8 – Gráficos 3d das tensões principais mínimas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



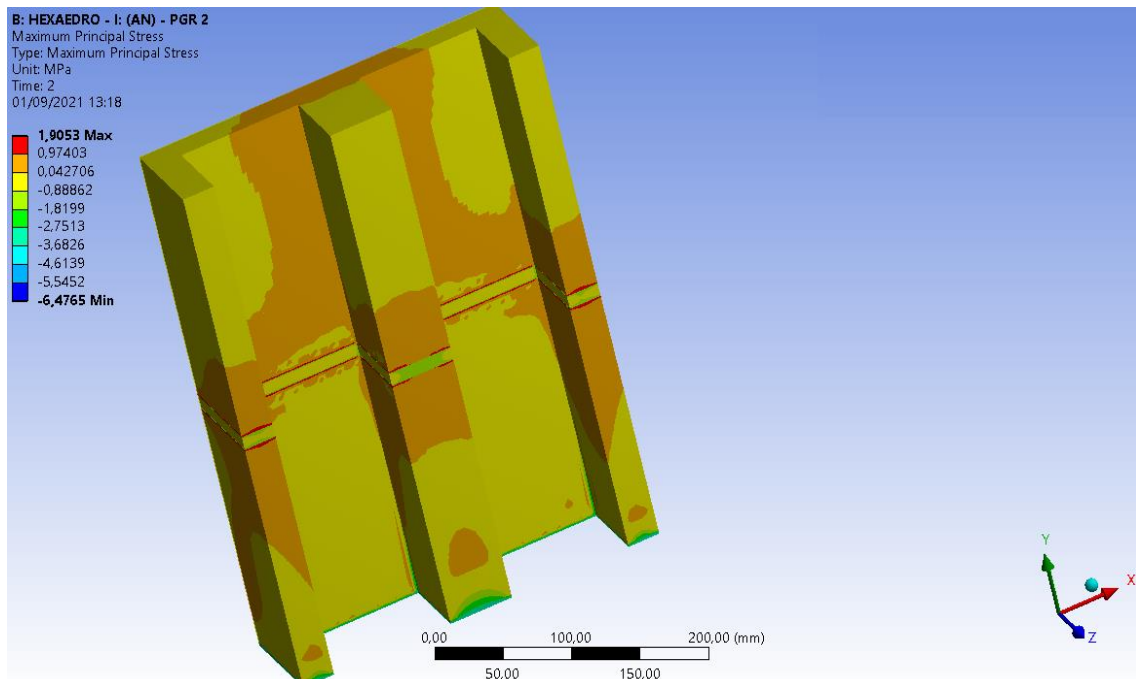
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.9 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



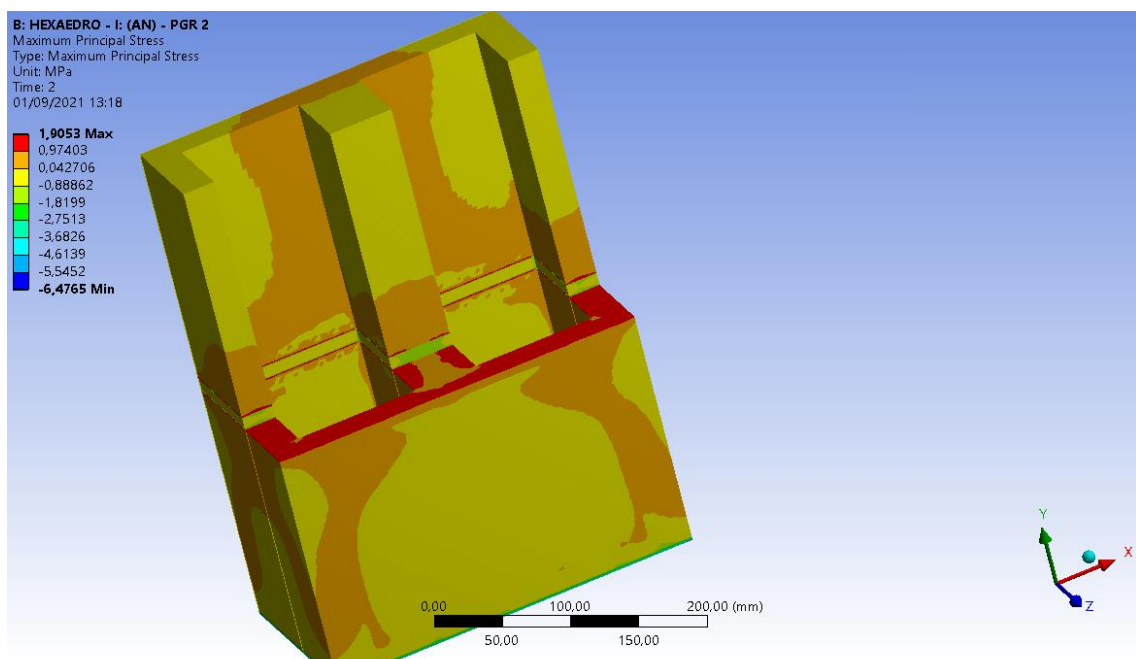
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.10 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



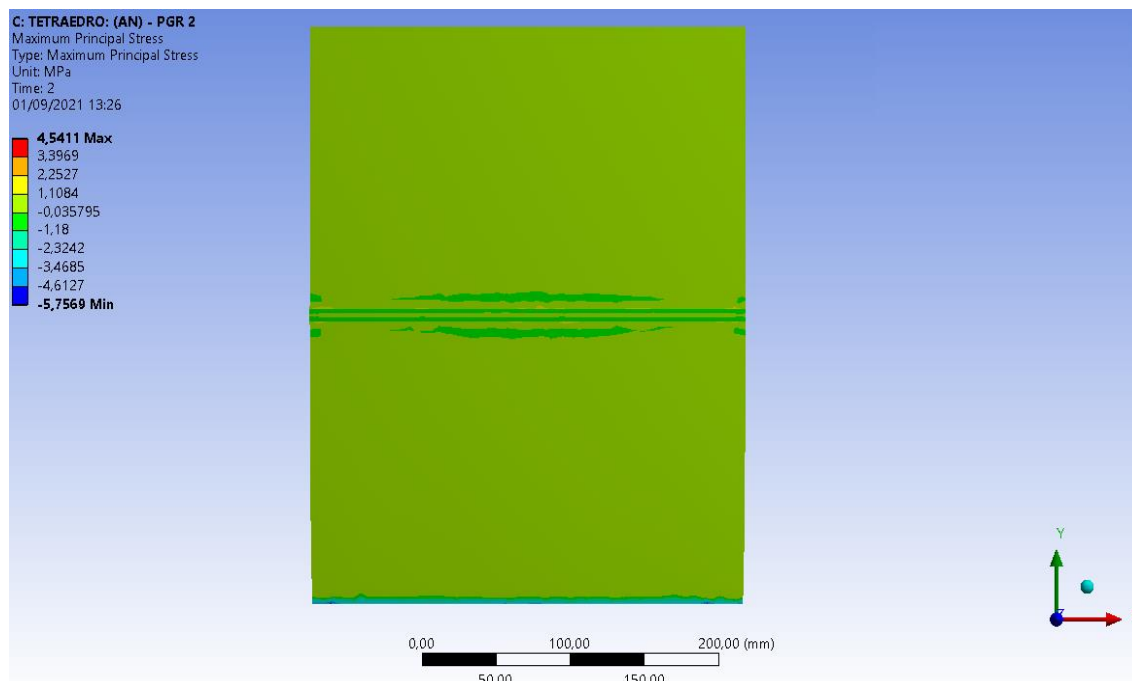
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.11 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Independente para geometria PGR 2



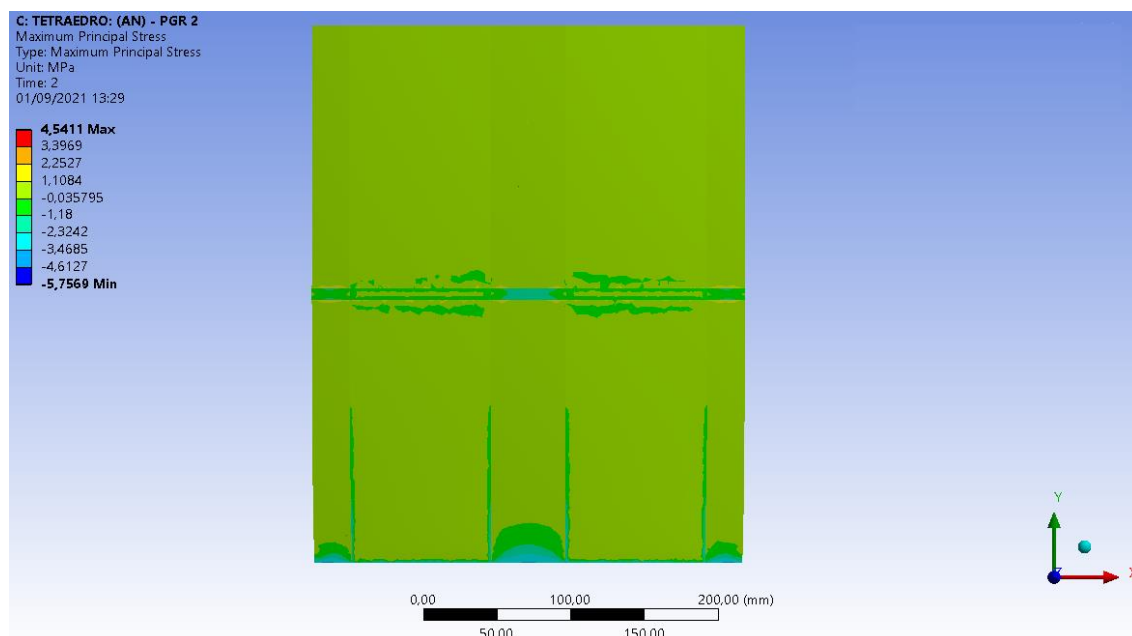
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.12 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



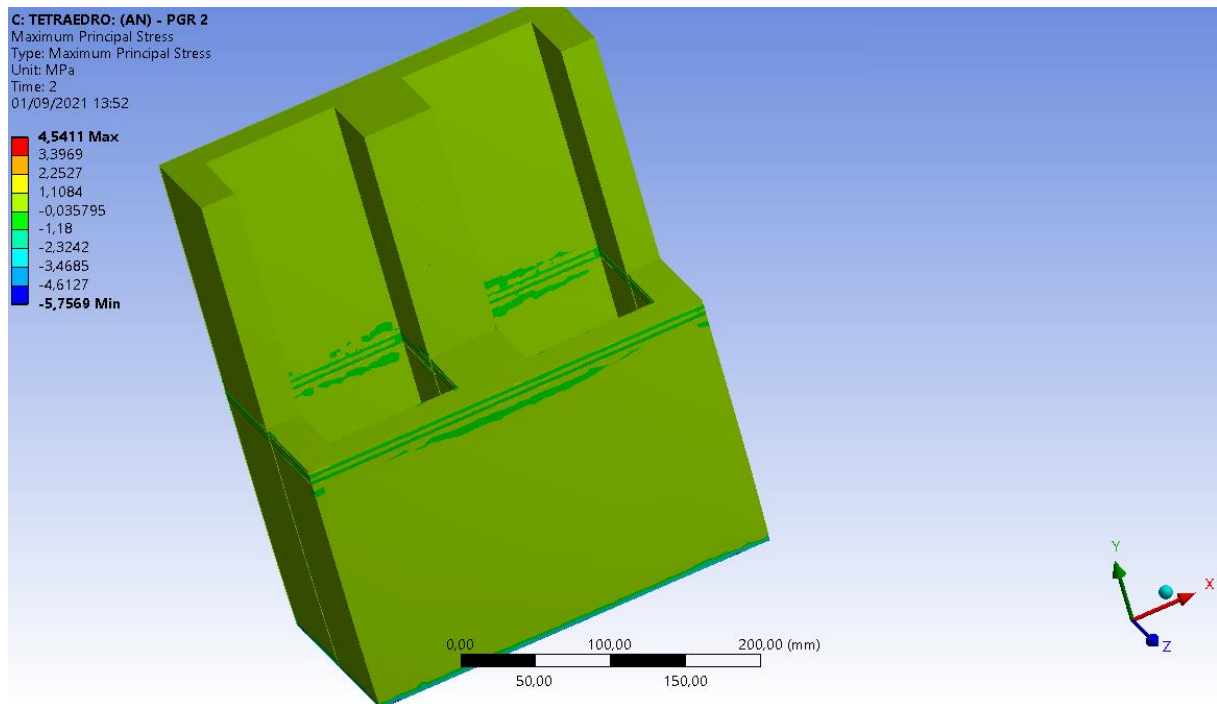
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.13 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



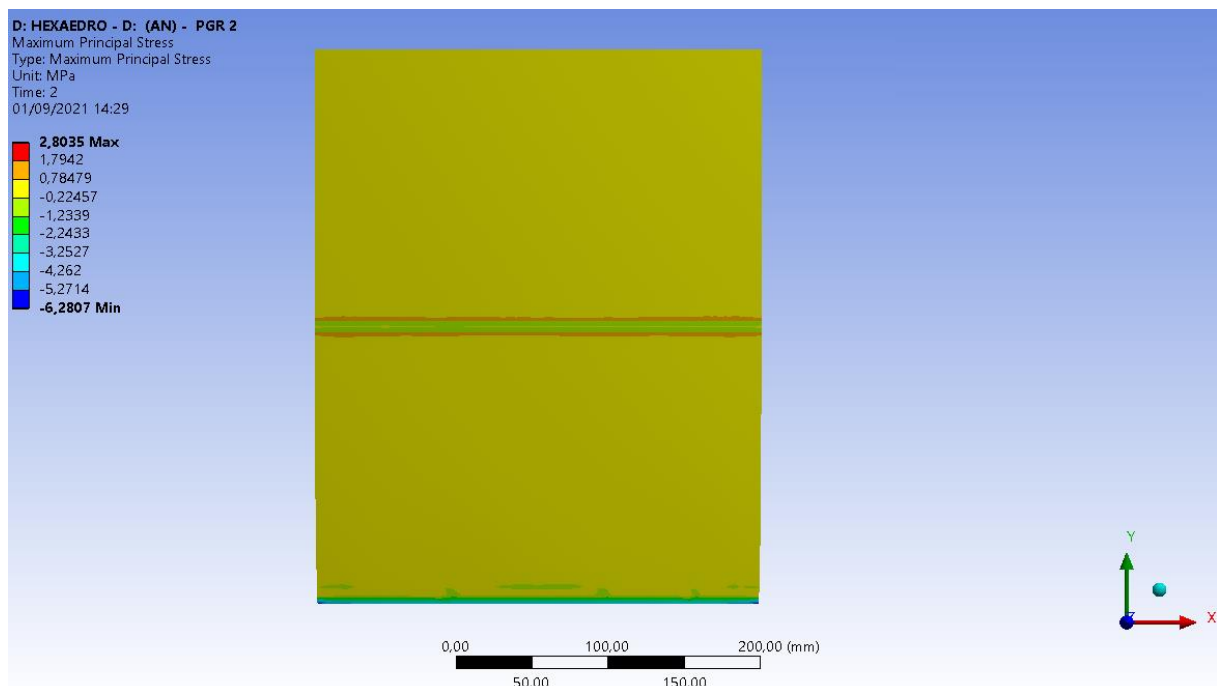
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.14 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Tetraédrica para geometria PGR 2



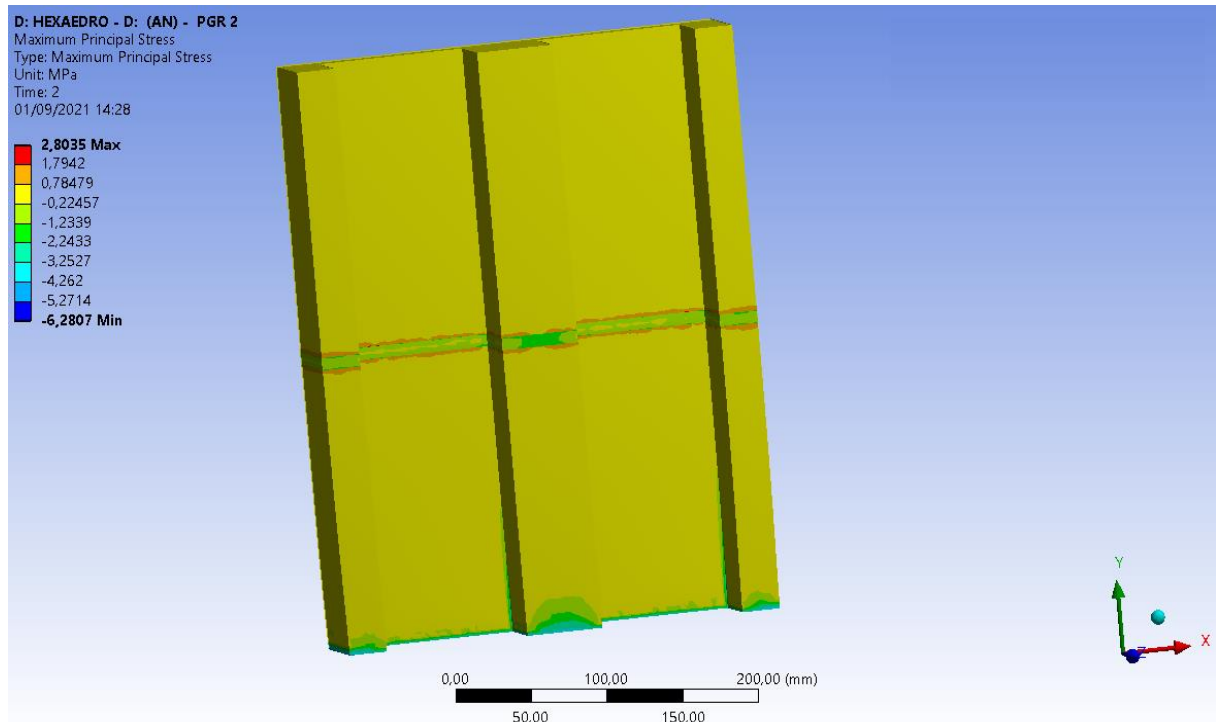
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.15 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



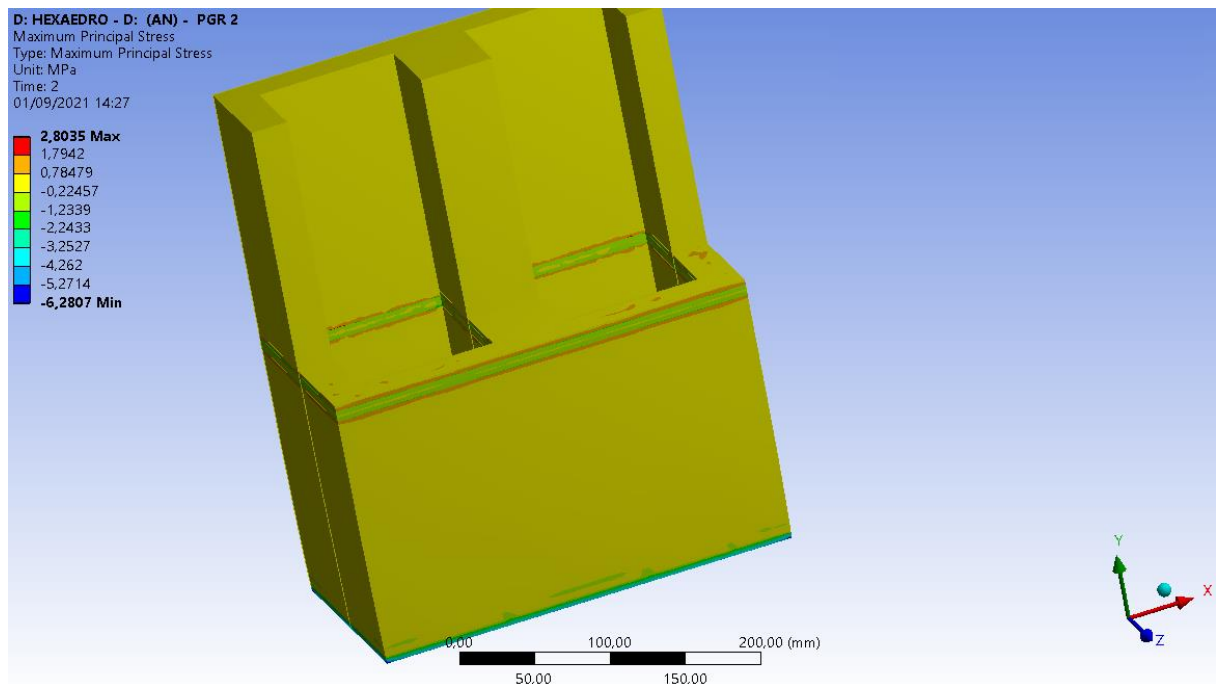
Fonte: Próprio autor

Figura B.6.16 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



Fonte: Próprio autor

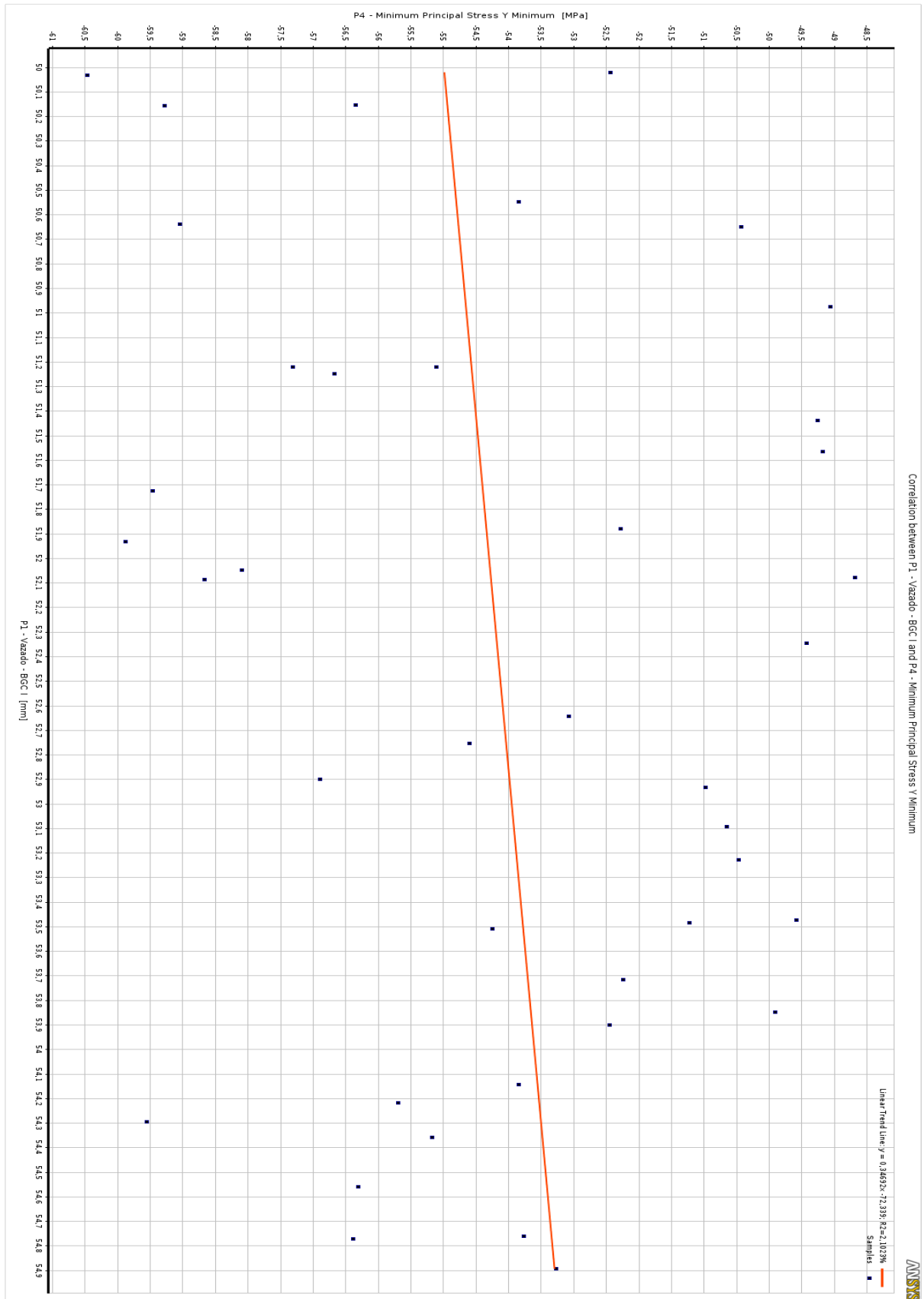
Figura B.6.17 – Gráficos 3d das tensões principais máximas desenvolvidas a partir da malha Hexaedra Linear Dependente para geometria PGR 2



Fonte: Próprio autor

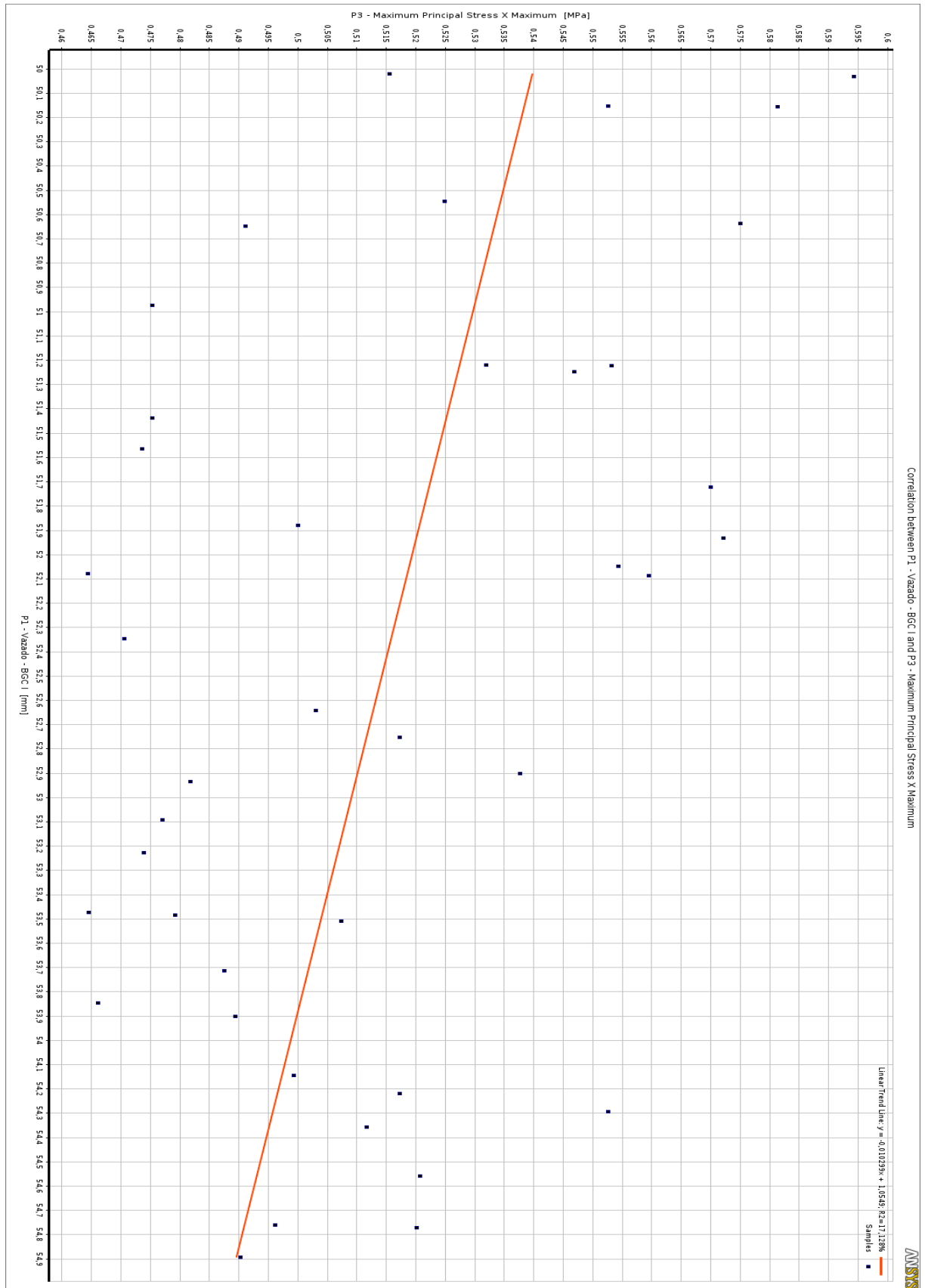
**APÊNDICE C – GRÁFICOS DAS CORRELAÇÕES LINEARES PARAMÉTRICAS
DA INFLUÊNCIA ENTRE OS PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA NAS
ANÁLISES DAS TENSÕES NOS BLOCOS BGC I, BGH I E BGR I**

Figura C. 1 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão mínima principal em Y – BGC I



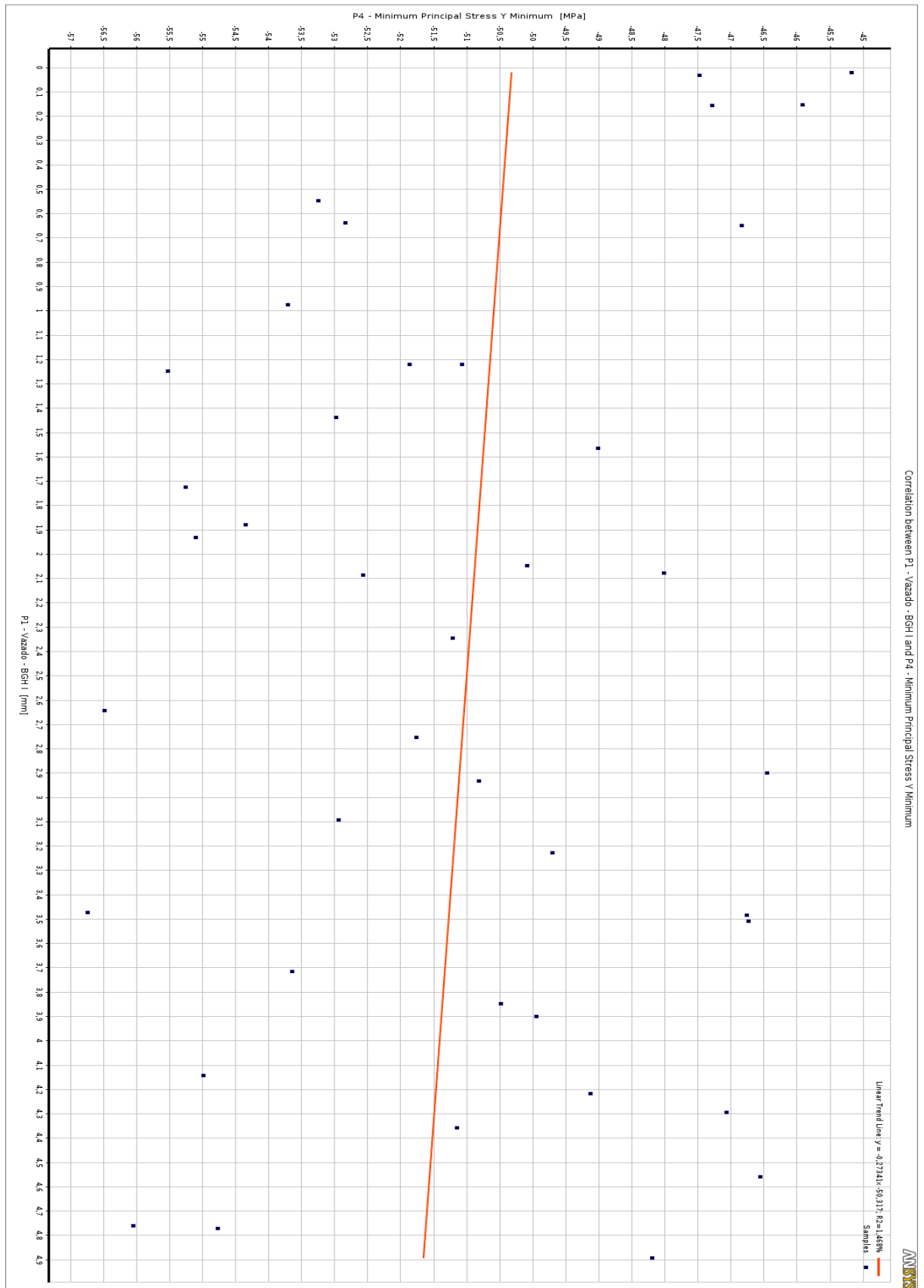
Fonte: Próprio autor

Figura C. 2 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão máxima principal em X – BGC I



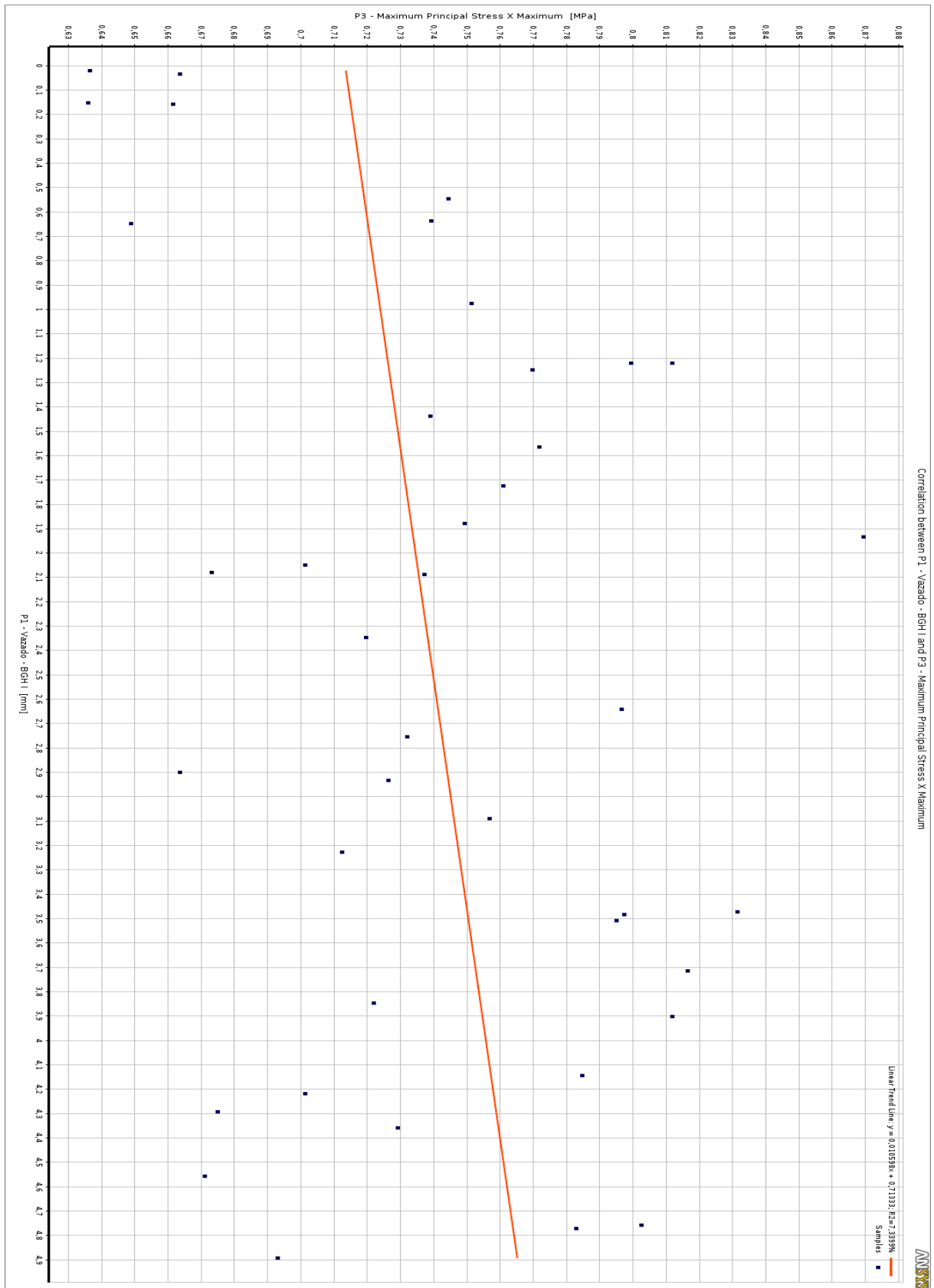
Fonte: Próprio autor

Figura C. 3 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão mínima principal em Y – BGH I



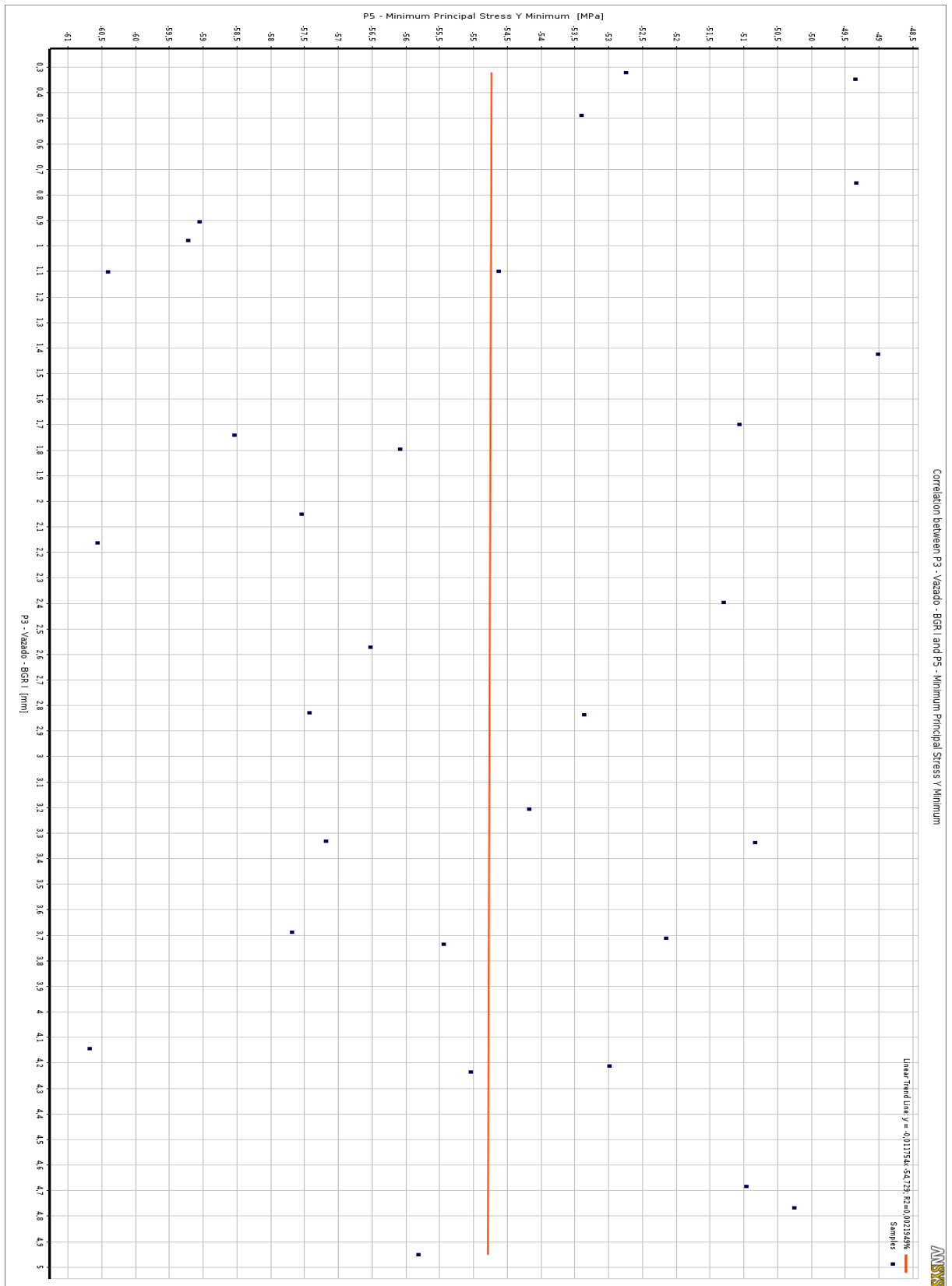
Fonte: Próprio autor

Figura C. 4 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão máxima principal em X – BGH I



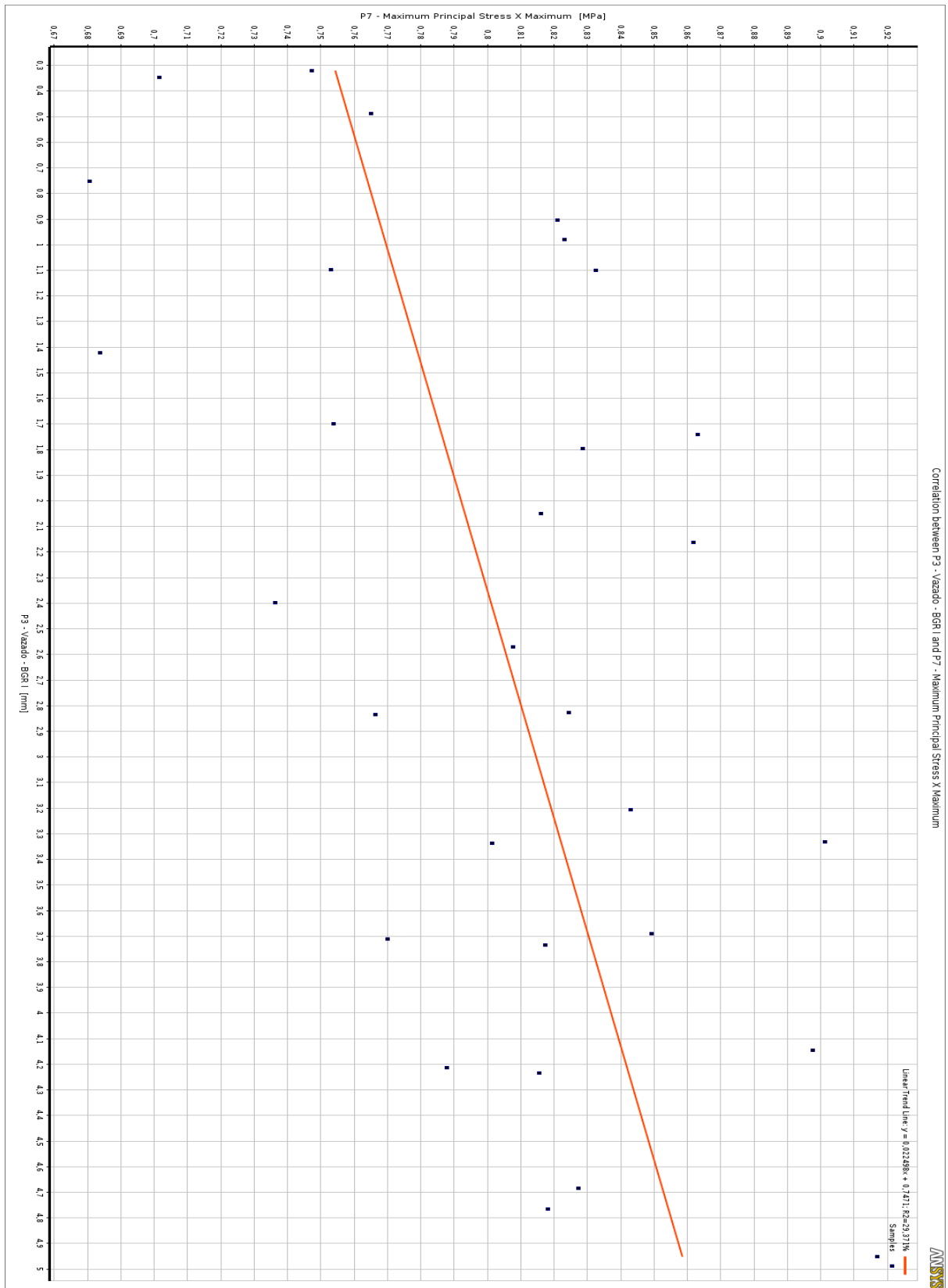
Fonte: Próprio autor

Figura C. 5 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão mínima principal em Y – BGR I



Fonte: Próprio autor

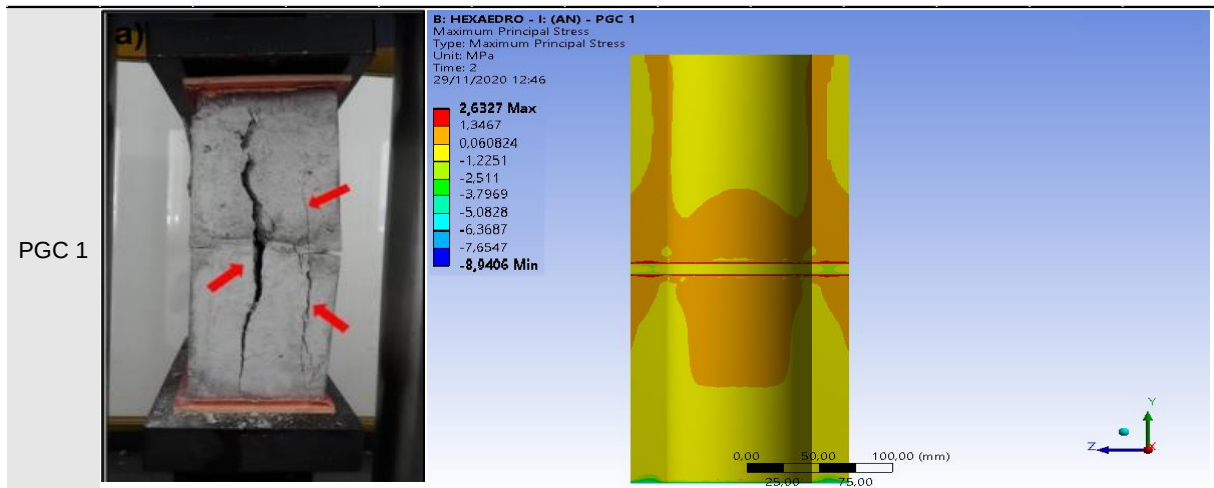
Figura C. 6 – Correlação paramétrica para variação geométrica e tensão máxima principal em X – BGR I



Fonte: Próprio autor

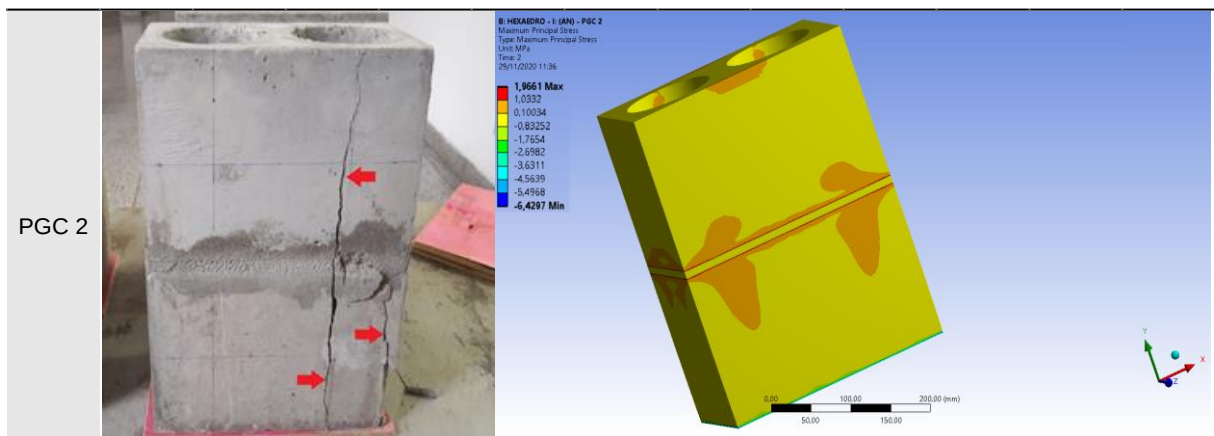
APÊNDICE D – GRÁFICOS DAS TENSÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS E IMAGENS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DAS FISSURAS E RUPTURAS DOS PRISMAS

Figura D. 1 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGC 1



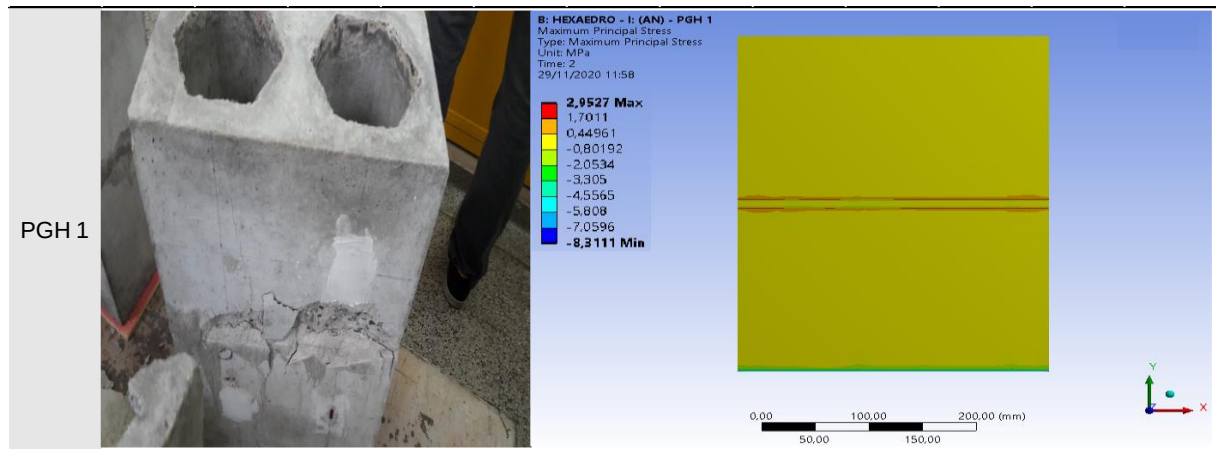
Fonte: Próprio autor

Figura D. 2 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGC 2



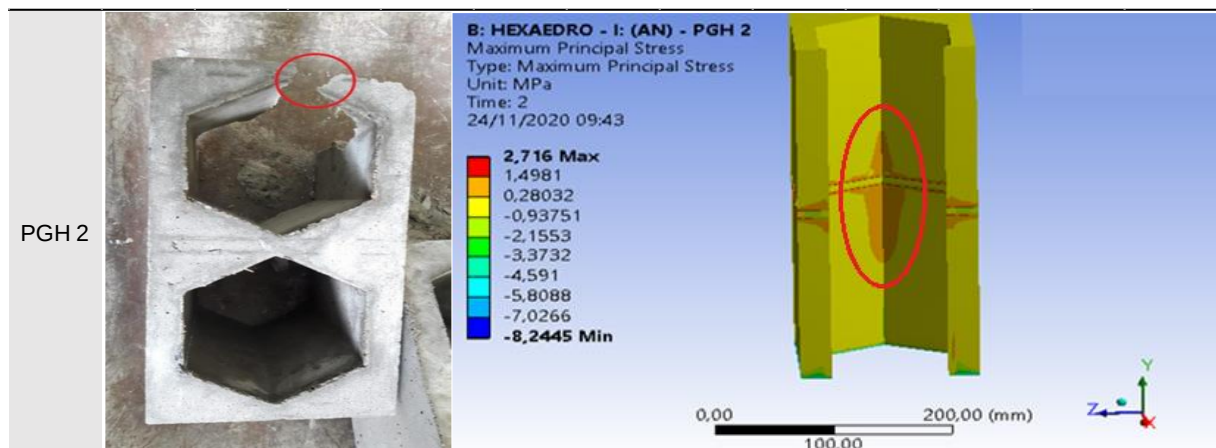
Fonte: Próprio autor

Figura D. 3 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGH 1



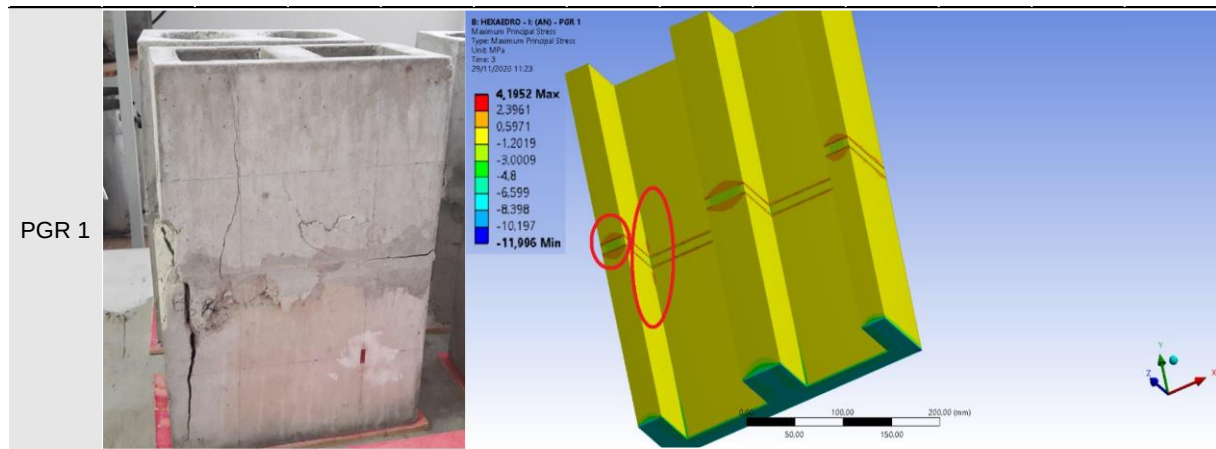
Fonte: Próprio autor

Figura D. 4 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGH 2



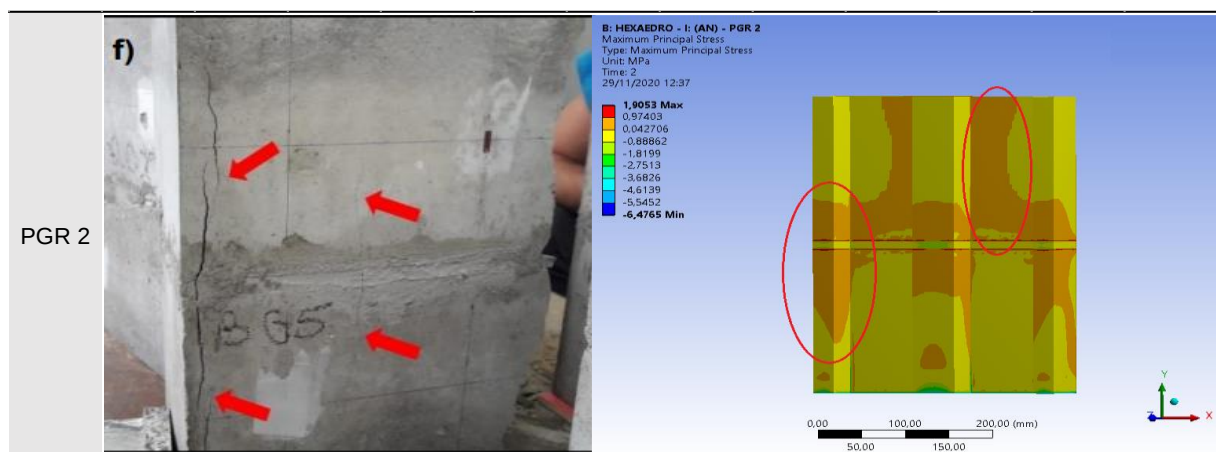
Fonte: Próprio autor

Figura D.5 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGR 1



Fonte: Próprio autor

Figura D. 6 – Desenvolvimento das fissuras experimentais x concentração de tensão de tração no prisma – PGR 2



Fonte: Próprio autor